Revista Internacional de
Ingeniería
de Estructuras

Vol. 25, 1, 61-95 (2020)

NEW FUNCTIONS OF THE CEINCI-LAB SYSTEM FOR 3-D SEISMIC ANALYSIS OF IRREGULAR STRUCTURES

Brian Cagua[(1)], Julia Pilatasig[(1)] , Roberto Aguiar[(2)]

[(1)]Maestría en Estructuras. Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE. bjcagua@espe.edu.ec
jepilatasig3@espe.edu.ec
[(2)]Profesor. Departamento de Ciencias de la Tierra y la Construcción. Universidad de Fuerzas Amadas ESPE. Av. Gral. Rumiñahui s/n, Valle de los Chillos.
Carrera de Ingeniería Civil. Facultad de Ingeniería. Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí
rraguiar@espe.edu.ec

Received: Dec 2019. Accepted: January 2020

ABSTRACT

Maintaining the didactic objective of the **CEINCI-LAB** computer system, this article presents new functions that facilitate the spatial seismic analysis of an irregular structure in plan and elevation, generates the three-dimensional drawing of the structure, the data entry of the sections of its elements in structures formed only by beams and columns with unique sections.

Performing the calculation of the stiffness matrix in floor coordinates, is one of the most important and complicated aspects of seismic analysis and that is why the flat and spatial analysis of an irregular structure will be exemplified.

keywords: New functions of ***CEINCI-LAB***. Spectral method. 3D Irregular Structures.

NUEVAS FUNCIONES DEL SISTEMA *CEINCI-LAB* PARA ANÁLISIS SÍSMICO ESPACIAL DE ESTRUCTURAS IRREGULARES

RESUMEN

Manteniendo el objetivo didáctico del sistema de computación ***CEINCI-LAB***, en este artículo se presentan nuevas funciones que facilitan el análisis sísmico espacial de una estructura irregular en planta y elevación, genera el dibujo en tres dimensiones de la estructura, la entrada de datos de las secciones de sus elementos en estructuras conformadas solo por vigas y columnas con secciones únicas.

Realizar el cálculo de la matriz de rigidez en coordenadas de piso, es uno de los aspectos más importantes y complicados del análisis sísmico y es por ello por lo que se ejemplificará el análisis plano y espacial de una estructura irregular.

Palabras Claves: Nuevas funciones de ***CEINCI-LAB***. Método espectral. Estructuras espaciales irregulares.

1. INTRODUCCIÓN

El usuario del sistema de computación ***CEINCI-LAB*** debe conocer cómo se resuelve una estructura ante cargas estáticas o la forma de realizar el análisis sísmico de un edificio en tres dimensiones.

Para cumplir con el objetivo del análisis sísmico, en este artículo, se presentan nuevas funciones que permiten graficar y analizar sísmicamente una estructura irregular en el plano y en tres dimensiones, la entrada de datos es sencilla y por ello los usuarios se van a motivar en realizar el análisis sísmico empleando las rutinas de **CEINCI-LAB**.

CEINCI-LAB es un programa didáctico cuyo espíritu es ayudar a los usuarios a entender la secuencia de cálculo del análisis estructural y con ello apoyar a afianzar sus conocimientos con la realización de ejercicios; sin embargo, con las nuevas contribuciones se facilita el ingreso de la geometría de la estructura.

En artículos anteriores los autores han presentado funciones para el análisis sísmico de estructuras en el plano y espaciales regulares. Este artículo se convierte en un complemento a estos trabajos, pero para estructuras espaciales irregulares con pórticos conformados por columnas y vigas de secciones únicas.

2. FUNCIONES DE *CEINCI-LAB*

Es recomendable que el lector conozca las funciones básicas que se encuentran en Aguiar (2014) y las nuevas funciones que se presentaron en Aguiar *et al.* (2019), estas últimas muy rápidamente son:

- ***[nv,np,nudt,nudcol,nudvg,nod,nr]=geometria_nudo_viga(sv,sp)***

El programa ***geometria_nudo_viga*** facilita notablemente el ingreso de datos de la geometría de un pórtico regular; los datos de ingreso son: ***sv*** que es un vector que contiene las luces de cada uno de los vanos; ***sp*** es otro vector con la altura de cada uno de los pisos. El programa reporte: ***nv*** número de vanos; ***np*** número de pisos; ***nudt*** es el número de elementos totales, se recuerda que en cada viga se considera un nudo en la mitad; ***nudcol*** es el número de columnas; ***nudvg*** es el número de vigas; ***nod*** es el número de nudos; ***nr*** es el número de nudos restringidos.

- ***[X,Y]=glinea_portico2(nv,np,sv,sp,nod,nr)***

Este programa es similar a la función ***glinea_portico*** (ver funciones básicas de ***CEINCI-LAB***, en Aguiar, 2014), pero la entrada de datos es diferente. Determinar los dos vectores ***X, Y*** con parte de los resultados que reporta el programa anterior. Solo sirve para pórticos regulares, considerando nudo en la mitad de las vigas.

- ***[NI,NJ]=gn_portico2(nr, nv, nudt, nudcol, nudvg)***

Programa similar a ***gn_portico*** que determina los vectores con las coordenadas del nudo inicial y final denominados ***NI,NJ*** pero en esta ocasión los datos de entrada son diferentes.

- ***[X,Y,Z,nvgY,nportz,nodA]=glinea_portico3D(CoordY,nr,np,nv,sp,nod,X,Y)***

Este programa genera las coordenadas de los nudos: X, Y, Z de la estructura espacial. El usuario primero indica la geometría de los Pórticos en sentido X; en efecto, para cada pórtico da las luces entre vanos (sv) y la altura de piso (sp). Posteriormente se requiere especificar los pórticos en las coordenadas Y para ello se emplea el vector denominado **CoordY**, se recomienda imponerse unos ejes de referencia X, Y en la parte inferior izquierda de la estructura.

- ***[NI,NJ]=gn_portico3D(nudcol,nudvg,nvgY,nportz,nod,nudt,nodA,NI,NJ)***

Programa para generar el Nudo inicial y final de los elementos denominados ***NI, NJ*** pero de la estructura en tres dimensiones. Los datos de ingreso son: **nudcol** número de columnas; **nudvg** número de vigas; **nvgY** Número de vigas en Y; **nportz** Número de pórticos en Y; **nod** número de nudos; **nudt** número de elementos; **nodA** Número de nudos adicionales (nudo medio de las vigas en Y); **NI, NJ** Vectores con los nudos iniciales y finales generados, para un pórtico en el plano XZ.

- ***dibujo3D(X,Y,Z,NI,NJ)***

Programa para dibujar una estructura tridimensional, este programa ayuda a visualizar en 3 dimensiones la estructura. Los datos para ingresar son: **X** Vector que contiene coordenadas en X; **Y** Vector con las coordenadas en Y, **Z** Vector que contiene coordenadas en Z; **NI** Vector con los nudos iniciales de los elementos; **NJ** Vector con los nudos finales de los elementos.

3. NUEVAS FUNCIONES DE *CEINCI-LAB*

En esta sección del artículo se presentan las nuevas funciones para graficar la estructura irregular en dos y tres dimensiones, para el ingreso de las secciones de los elementos y para el análisis sísmico espacial considerando un modelo de piso rígido con tres grados de libertad por planta.

- ***[VecComb]=Combinar_Vectores(NumVect,V1,V2,V3,V4,V5,V6,V7,V8,V9,V10)***

Este programa combina vectores en una matriz ***VecComb***, el propósito es mantener la información referente a la geometría de la estructura de forma compacta. Los datos son: ***NumVect*** el número de vectores a combinar; ***V1, V2, …,***

V10 son los vectores con la información a combinar (no requieren ser de la misma dimensión); en caso de requerir combinar menos de 10 vectores se debe colocar cero en lugar de Vi.

- ***[nr,nod,np,nELEM,X,Y,NI,NJ]=geom_2D_Irreg(Num_Comb,svF,spF,XoF,YoF);***

Este programa permite determinar la geometría de un pórtico plano (2D), calcula parámetros necesarios para el análisis sísmico como **nr** número de restricciones; nod número de nudos; np número de pisos, nELEM cantidad de elementos; también se presenta las coordenadas de los nudos: X, Y de la estructura en el plano en los vectores ***X, Y*** respectivamente; ***NI*** Vector con los nudos iniciales de los elementos; ***NJ*** Vector con los nudos finales de los elementos. Se requiere de datos la siguiente información: ***Num_Comb*** tiene que ver con el número de partes que componen a la estructura; ***svF*** matriz que contiene las luces de cada uno de los vanos de los pórticos correspondientes a las “partes que componen la estructura” y de forma similar la matriz ***spF*** pero referente a las alturas de piso; ***XoF, YoF*** que permiten desfasar en sentido X o Y a las partes que componen a la estructura respecto a los ejes de referencia X, Y del origen de coordenadas impuestos.

- ***[nPortX,nPortY,X,Y,Z,NI,NJ]=geom_3D_Irreg(Num_Comb,svF,spF,CoordYF,XoF,ZoF)***

Programa para identificar el número de pórticos que componen la estructura espacial en los sentidos “XZ” ***nPortX*** y “YZ” ***nPortY***; también se presenta las coordenadas de los nudos: X, Y, Z de la estructura espacial en los vectores ***X, Y, Z*** respectivamente; ***NI*** Vector con los nudos iniciales de los elementos; ***NJ*** Vector con los nudos finales de los elementos. Los datos requeridos son similares a los detallados en la rutina anterior ***geom_2D_Irreg*** pero con la información de la estructura espacial, más adelante en el ejemplo se podrá comprender de mejor manera a lo que se refiere con “partes que componen a la estructura”. La matriz ***CoordYF*** con las coordenadas de los pórticos en sentido Y de cada parte de la estructura es lo único que difiere en el caso espacial.

- ***dibujo_2Di(X,Y,Z,NI,NJ,nelem,dibuj_plan)***

Programa para dibujar pórticos en 2D de una estructura tridimensional y genera la vista en planta de esta. Los datos para ingresar son: ***X*** Vector que contiene coordenadas en X; ***Y*** Vector con las coordenadas en Y, ***Z*** Vector que contiene coordenadas en Z; ***NI*** Vector con los nudos iniciales de los elementos; ***NJ*** Vector con los nudos finales de los elementos; ***nelem*** número de elementos de la estructura principal (columnas y vigas), en estructuras con elementos diagonales la rutina representa a los elementos diagonales de color rojo y a la estructura principal de color azul; ***dibuj_plan*** es una matriz de 2 filas, se identifica a la primera columna con cero o uno de acuerdo al sentido del pórtico que se desea representar, donde cero corresponde al sentido XZ y uno para el sentido YZ, a continuación de estos números se escribe una lista con el número de pórtico que

se desea dibujar en cada sentido. Es importante indicar que las dos filas de la matriz ***dibuj_plan*** debe contener la misma cantidad de columnas, en el caso de querer representar más pórticos en un sentido que en otro se debe completar con ceros los espacios para completar las mismas columnas en ambas filas.

- ***dibujoNudElem(X,Y,NI,NJ,CG)***

Esta función permite graficar pórticos planos en cada iteración de análisis para los sentidos XZ o YZ y presenta de color rojo los nudos con la identificación de cada nudo (nombre o etiqueta asignado en cada análisis, siempre empieza a enumerar en uno) además de color azul identifica a cada elemento del pórtico. Los datos requeridos son: ***X*** Vector que contiene coordenadas en X; ***Y*** Vector con las coordenadas en Y (X representa las coordenadas e los nudos en sentido de análisis, Y representan las coordenadas en elevación de los nudos); ***NI*** Vector con los nudos iniciales de los elementos; ***NJ*** Vector con los nudos finales de los elementos; ***CG*** grados de libertad asignados a los nudos, toda la información debe corresponder al pórtico de análisis.

- ***[nglXi,ELEMXi,Lxi,senoxi,cosenoxi,VCXi,Xxi,Zxi,NIXi,NJXi,CGXi]=Datos_KLx_3D_Irreg(i,nPortY,ELEMX,X,Y,Z,NI,NJ);***

Este programa permite generar los datos para calcular la rigidez de pórticos planos en sentido XZ en la iteración para pórticos 3D. Los datos a ingresar son: **i** Indica el pórtico de análisis (Ej. i=1, Pórtico 1 y si i=n, Pórtico n); ***nPortY*** Número de pórticos en X; ***ELEMX*** Matriz que contiene la base y la altura de cada elemento o área e inercia si es acero; ***X*** coordenadas "X" de los nudos; ***Y*** coordenadas "Y" de los nudos, ***Z*** coordenadas en “Z” de los nudos; ***NI, NJ*** Vectores con los nudos iniciales y finales generados.

Lo que nos reporta el programa es lo siguiente: ***nglXi*** Número de grados de libertad en el pórtico de análisis; ***ELEMXi***, Matriz que contiene la base y la altura de cada elemento o área e inercia si es acero, pero del pórtico de análisis; ***Lxi*** Vector que contiene la longitud de los elementos; ***senoxi*** Vector que contiene los senos de los elementos; ***cosenoxi*** Vector que contiene los cosenos de los elementos; ***VCXi*** Matriz que contiene los vectores de colocación de elementos, ***Xxi*** coordenadas "X" de los nudos; ***Zxi*** coordenadas "Z" de los nudos, ***NIxi, NJxi*** Vectores con los nudos iniciales y finales generados y ***CGXi*** los grados de libertad asignados a los nudos, nuevamente todo esto del pórtico de análisis en sentido X.

Esta rutina identifica los nudos y elementos que corresponden al pórtico de análisis en sentido XZ y reordena la información necesaria específicamente para el análisis de dicho pórtico en nuevos vectores o matrices identificados como “..xi”.

La información referente a la sección de los elementos en la matriz ***ELEMX*** solo corresponde a columnas y vigas, es decir una matriz cuadrada de 2x2 donde la primera fila corresponde a la base y altura de columnas y la segunda fila lo propio para vigas; en caso de ser de acero se debe ingresar área e inercia de los elementos de las columnas y de vigas. En la rutina se identifica los

elementos verticales como columnas a los cuales se le asigna la propiedad de columnas, luego se analiza que los elementos horizontales corresponden a vigas y se asigna las propiedades de esta.

- ***[nglYi,ELEMYi,Lyi,senoyi,cosenoyi,VCYi,Yyi,Zyi,NIYi,NJYi,CGYi]=Datos_KLy_3D_Irreg(i,nPortX,ELEMY,X,Y,Z,NI,NJ)***

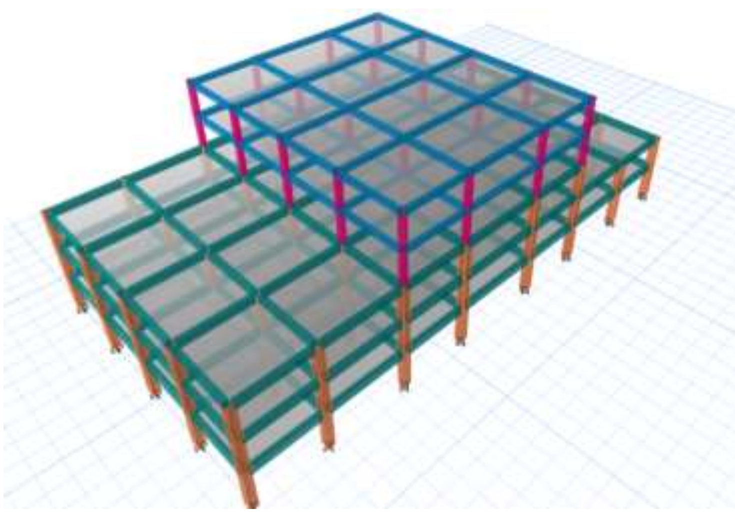
Es similar al anterior, pero con los pórticos en sentido Y, por lo que se omite su descripción.

- ***[Derv]=deriva2(YY,qtiX,qtiY)***

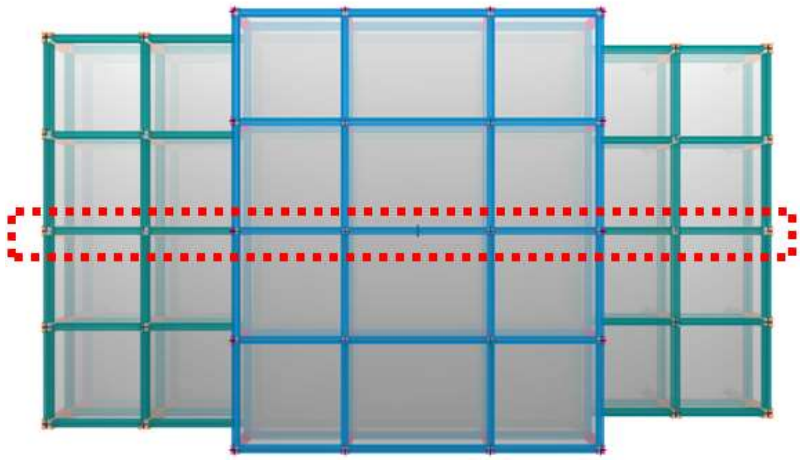
Este programa permite determinar las derivas inelásticas de la estructura en sentido XZ y YZ, además genera una gráfica con desplazamientos inelásticos y derivas en ambos sentidos donde el color azul representa el sentido XZ y rojo YZ. Los datos son: ***YY*** es un vector que contiene las coordenadas en elevación de cada nivel; ***qtiX*** es un vector con los desplazamientos inelásticos en sentido XZ de cada nivel y ***qtiY*** es lo propio en sentido YZ.

4. ANÁLISIS SÍSMICO DE ESTRUCTURA EN 2 D

En esta sección se presenta el cálculo de la matriz de rigidez, en sentido longitudinal de una estructura irregular de 5 pisos de hormigón armado, en muchas estructuras la geometría de los pórticos e incluso las secciones y materiales de los elementos de los mismos son iguales para todos los pórticos que conforman la estructura espacial y es por ello que resulta interesante solo calcular la matriz de rigidez en el plano, es decir de un pórtico tipo de la estructura y en base a ello determinar la matriz de rigidez lateral en sentido de análisis. La vista en 3D se presenta en la figura 1 a y la vista en planta en la figura 1 b donde se indica el pórtico tipo en análisis, tiene 5 pórticos en sentido X y 8 pórticos en sentido transversal.



(a)



(b)

Figura 1 a) Vista tridimensional de la edificación; b) Vista en planta de la estructura, considerando el pórtico en análisis.

Se quiere hacer notar que en sentido transversal existen 2 tipos de pórticos donde cada uno de ellos son regulares en el plano de análisis; para determinar la matriz de rigidez de cada uno de ellos se puede emplear las rutinas anteriores de **CEINCI-LAB** correspondientes a este tipo de planos que son detalladas en el artículo "**INTERFASE ICEINCI-LAB Y NUEVAS FUNCIONES**".

Como se menciona anteriormente este ejemplo corresponde a una estructura espacial conformada por un pórtico tipo en sentido longitudinal donde las secciones y materiales de los elementos del pórtico indicado en rojo en la figura 1 b es constante para la estructura. En la figura 2 se presenta la geometría de dicho pórtico y se indica las secciones de cada elemento (columna y viga).

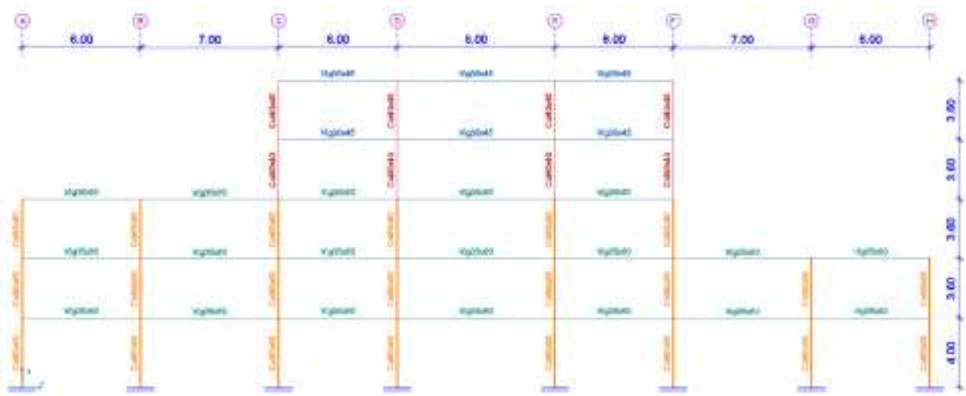


Figura 2 Pórtico tipo en sentido longitudinal del Bloque Estructural; las columnas son de 60x60 y las vigas son de 35x60 en los primeros 3 niveles, para niveles superiores las columnas son de 40x40 y las vigas de 30x45.

4.1 Ingreso de datos de geometría de estructura

La estructura tridimensional con las irregularidades indicadas en la figura 1 a, puede ser generada desde 3 bloques o partes que componen la estructura como se indica en la figura 3 pero dependerá de cada usuario la forma de proceder únicamente se debe respetar que los bloques sean generados desde la base hacia la cubierta para que sean útiles las rutinas del análisis de estructuras regulares detalladas en artículos publicados anteriormente por los autores.

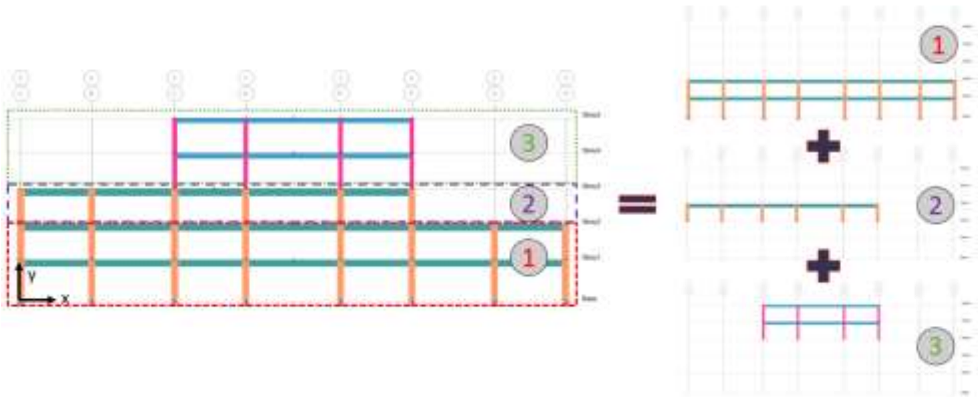


Figura 3 Composición del Bloque estructural para el análisis sísmico.

A continuación, se detalla el programa que realiza el análisis sísmico e inmediatamente se van comentando la entrada de datos.

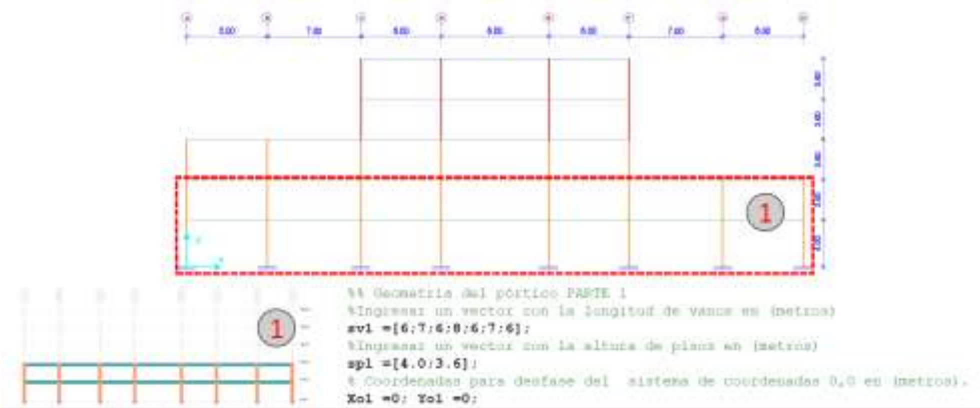
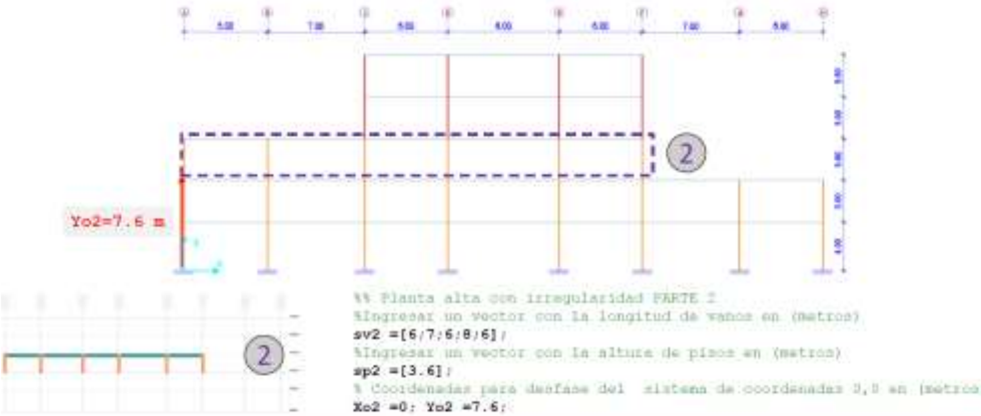


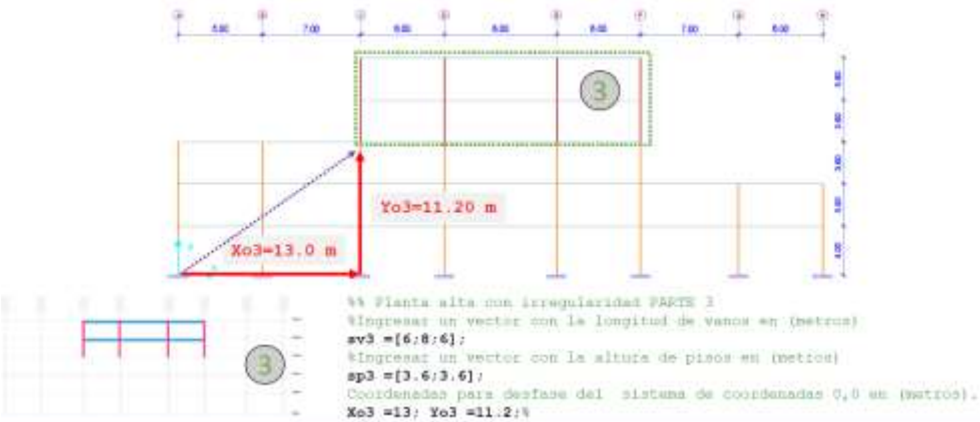
Figura 4 Parte 1 del del Pórtico y código de los datos requeridos.

Los pórticos de la parte 1 del Bloque Estructural en sentido longitudinal tienen 7 vanos de 6.0 m, 7.0 m y 8.00 m (figura 4); esa información se da en la variable “sv1”; la altura de cada piso es de 4.0 m para el primer piso y 3.60 para el nivel 2, esto se da en la variable “sp1”. Los valores de Xo1 y Yo1 son ceros debido a que este bloque estructural no será desplazado respecto al eje de coordenadas X=0, Y=0.

Para las partes 2 y 3 que componen al pórtico tipo como se indicó en la figura 3 se debe ingresar la separación de vanos y alturas de pisos en los vectores sp2, sp3, sv2 y sv3 para cada parte, como se detalla a continuación en las figuras 5 a y b, esto se lo hace como si fueran pórticos regulares y posteriormente para ubicarlos en las posiciones que corresponden a cada pórtico se debe ingresar la información de desface en Xo2, Xo3, Yo2, Yo3. Para la parte 2 se puede notar que Xo2 es cero debido a que el pórtico únicamente debe ser desfasado en sentido vertical es decir asignar el valor Yo2 como 7.60 m y para la parte 3 que compone el pórtico el desfase debe ser en sentido X e Y por ello se tienen los valores de 13 m y 11.20 m correspondientemente.



(a)



(b)

Figura 5 a) Parte 2 del Pórtico y código de los datos requeridos; b) Parte 3 del Pórtico y código de los datos requeridos.

Es posible generar el pórtico tipo con más partes de las que se muestra en este ejemplo o en algunos casos con estructuras de geometrías más complejas será necesario generar más partes que compongan al pórtico tipo y es por ello que

se genera el programa **Combinar_Vectores** con la intención de agrupar la información de separación de vanos, alturas de pisos y coordenadas de desfase en matrices finales que contengan la información completa de la estructura de forma resumida. En la figura 6 se puede observar cómo se emplea el programa mencionado donde se combina la información descrita en las matrices svF, spF, XoF, YoF. Se puede notar que existen 7 ceros luego de sv3, sp3, Xo3, Yo3, esto se debe a que se pueden combinar hasta 10 partes y en este caso únicamente se tienen 3, con el objetivo que funcione la rutina de Matlab debe completarse con ceros estos “vacíos”.

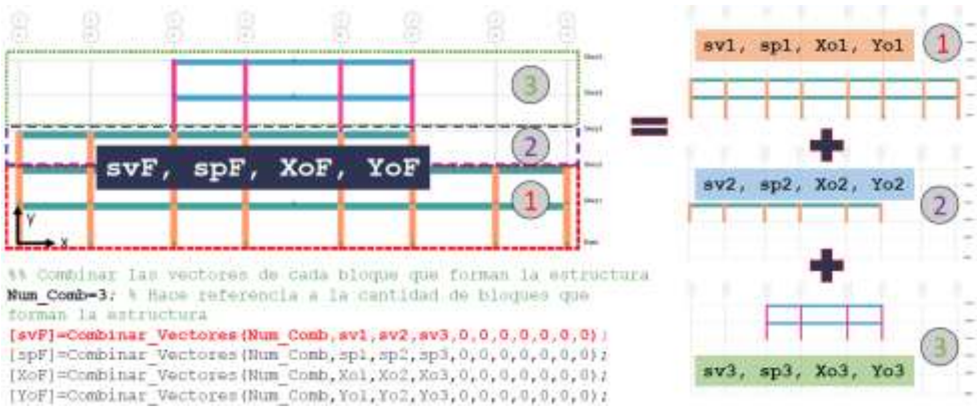


Figura 6 Combinar la información de las partes que componen el pórtico tipo.

En caso de que la estructura sea muy compleja y requiera más de 10 partes para conformar el pórtico tipo el usuario de **CEINCI-LAB** puede modificar la rutina ***Combinar_Vectores*** debido a que el código es abierto y adaptarse a sus necesidades particulares de forma sencilla.

Con los datos ingresados anteriormente y mediante el programa ***geom_2D_Irreg*** se puede determinar automáticamente la geometría del pórtico en análisis.

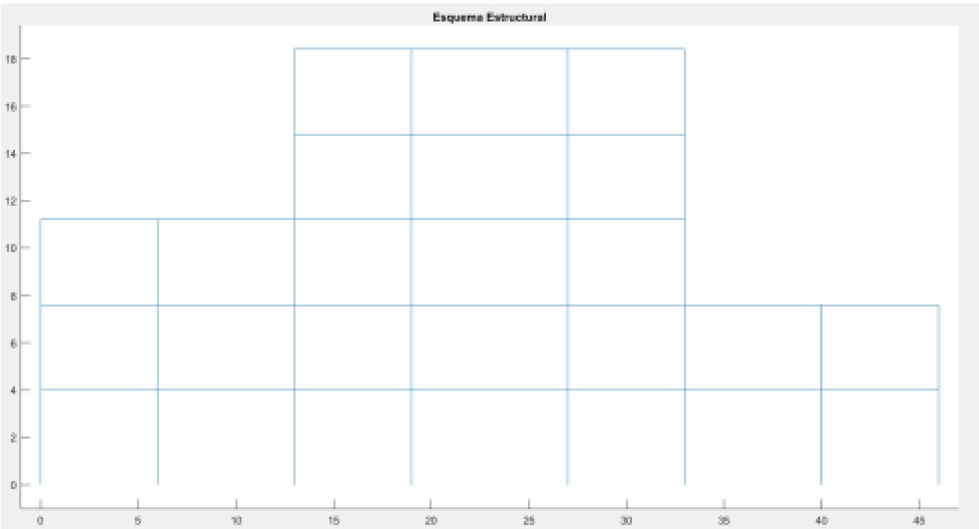
```
%% Geometría de la estructura en 2D
[nr,nod,np,nELEM,X,Y,NI,NJ]=geom_2D_Irreg(Num_Comb,svF,spF,Xo
F,YoF);
```

4.2 Dibujo de la estructura en 2D.

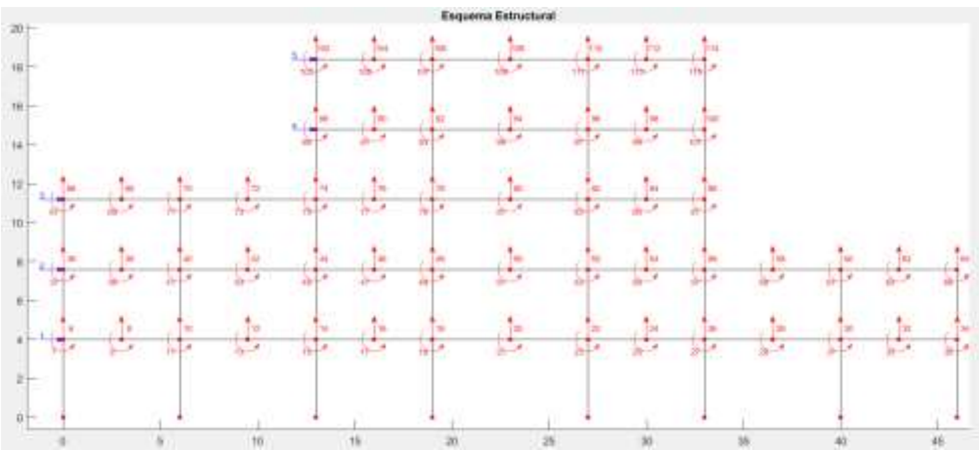
Se emplean algunas rutinas típicas para el análisis de grados de libertad y otra información relevante para el cálculo de la matriz de rigidez con **CEINCI-LAB**. De igual manera para el dibujo del pórtico típico se utilizan las rutinas ***dibujo***, ***dibujogdl*** y ***dibujoNudElem*** para obtener los gráficos del pórtico tipo, incluir los grados de libertad del análisis y enumerar automáticamente nudos y elementos con cada rutina (ver figura 7 a, b y c).

```
%% Cálculos de Grados de libertad e información relevante de
la estructura
[CG,ngl]=cg_sismo2(nod,nr,Y);
[L,seno,coseno]=longitud(X,Y,NI,NJ); %long. de @elem, seno y
coseno
[VC]=vc(NI,NJ,CG); %Vector de colocación

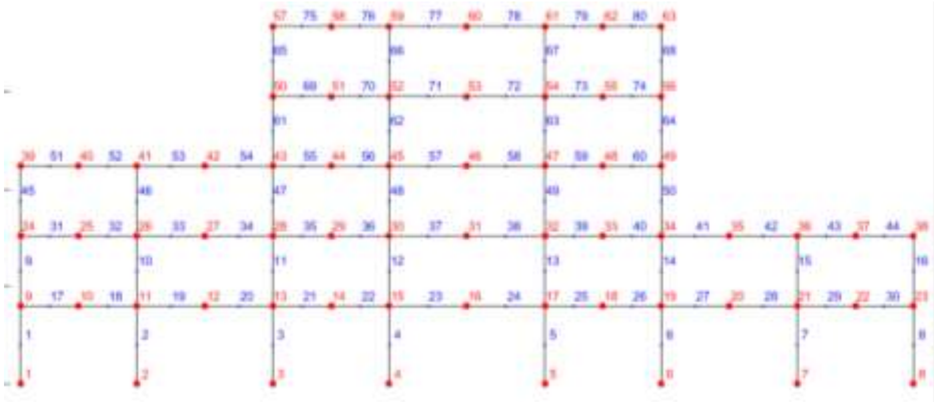
%% Dibujo de la Estructura 2D
dibujo(X,Y,NI,NJ)
dibujogdl(X,Y,NI,NJ,CG)
dibujoNudElem(X,Y,NI,NJ,CG)
```



(a)



(b)



(c)

Figura 7 a) Esquema estructural en 2D; b) Numeración de los grados de libertad, con azul se indican las coordenadas principales; c) Numeración de Nudos y Elementos, con rojo los nudos y de azul los elementos.

Al general el pórtico con la recomendación de emplear partes o bloques estructurales desde la base hacia la cubierta se puede emplear las rutinas anteriores de **CEINCI-LAB** sin realizar modificaciones adicionales para los grados de libertad. En la figura 7c se puede visualizar que los elementos se enumeran primero columnas de la parte 1 del pórtico, luego vigas del mismo bloque estructural, seguido de ello se enumeran columnas y vigas de los bloques 2 y luego del 3, esto es muy importante para asignar las secciones a cada elemento del pórtico, a continuación, se indica como se debe realizar esto. En el programa se presenta el valor de la resistencia del hormigón que es de $f_c' = 240\ {}^{kg}/_{cm^2}$ y la ecuación utilizada para calcular el módulo de elasticidad en T/m^2.

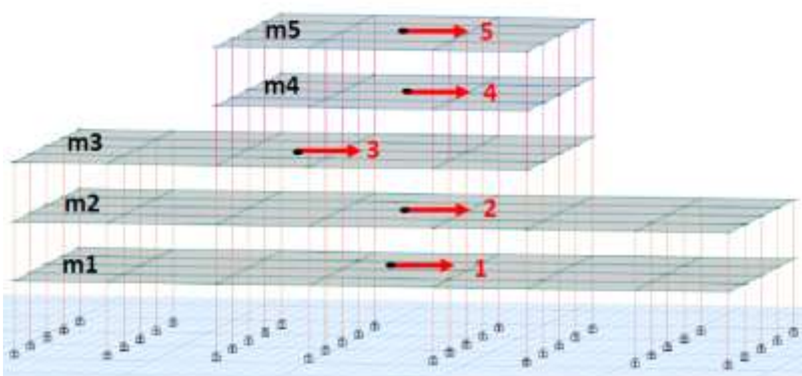
```
%% Propiedades del material
fc =240; % La resistencia a la compresión del hormigón f´c
(kg/cm2)
E=151000*sqrt(fc); % Calcula el módulo de elasticidad del
hotmigón (T/m2)
%% Secciones
SECCION=[ 1 0.60 0.60 15 1;
         17 0.35 0.60 27 1;
         45 0.60 0.60  5 1;
         51 0.35 0.60  9 1;
         61 0.40 0.40  7 1;
         69 0.30 0.45 11 1];
% SECCION=[i,b,h,nig,ii]
% i   Número del elemento
% b   Base de la sección del elemento
% h   Altura de la sección del elemento
% nig Número de elementos a generar adicionales
% ii  Incremento en la numeración de los elementos
[ELEMX]=gelem_portico(SECCION);
```

La matriz SECCION contiene las secciones de columnas y vigas de todos los elementos, en la primera fila se escribe **1 0.60 0.60 15 1** puesto que se empieza en el elemento 1 con una sección de hormigón armado cuya base es 0.60 m y altura 0.60 m, a continuación se escribe 15 debido a que los 15 elementos siguientes también tendrán esa misma sección y el incremento desde un elemento anterior a uno siguiente es de 1 en 1, por ello el ultimo valor es 1. Para la segunda fila se tiene algo similar con las vigas empezando en el elemento 17 como se muestra en la figura 7c, luego la base será 0.35m y la altura 0.60m generando 27 elementos de la misma sección con intervalos de elementos de 1 en 1. Para el resto de elemento es algo similar y el usuario puede identificar fácilmente el ingreso de secciones en el pórtico de análisis.

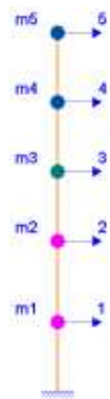
Con la rutina gelem_portico se asigna a cada elemento la base y altura correspondiente a la sección de hormigón armado de cada elemento de forma automática (en el caso de estructuras de acero se debe asignar área e inercia de la sección en lugar de base y altura).

4.3 Análisis con modelo de un grado de libertad por planta

Se calcula la matriz de rigidez de cada elemento y se determina la matriz de rigidez total (todos los grados de libertad). Para simplificar el análisis se puede condensar la rigidez total en los grados libertad principales, es decir los grados de libertad horizontales considerando el piso rígido (1gdl por piso) como se muestra en la figura 8.



(a)



(b)

Figura 8 a) Vista tridimensional de la edificación considerando piso rígido; b) Esquema simplificado para el análisis sísmico.

```
%% Matriz de Rigidez
[K]=krigidez(ngl,ELEMX,L,seno,coseno,VC,E); %<-----MATRIZ "K"
HORMIGÓN ARMADO (T/m)
%.......................................................
KTT=K; %<------- MATRIZ "K" DE TODA LA ESTRUCTURA (T/m)
na=np;
kaa=KTT(1:na,1:na);kab=KTT(1:na,na+1:ngl);
```

```
kba=kab'; kbb=KTT(na+1:ngl,na+1:ngl);
KL=kaa-kab*inv(kbb)*kba;
```

Para el análisis en sentido longitudinal se determina la suma de las matrices de rigidez de cada pórtico que para el caso es igual a multiplicar por 5 la matriz de rigidez del pórtico tipo.

$$\boldsymbol{KLX} = \sum_{\boldsymbol{i=1}}^{\boldsymbol{npx}} \boldsymbol{KL}^{(\boldsymbol{i})}$$

```
%% Asumiendo que los 5 pórticos son iguales
KLX=5*KL
```

La matriz de masas traslacionales considerando el piso rígido se tiene en base al siguiente código, para este caso la carga reactiva al sismo se considera como 100% de la carga muerta y 25% de la carga viva.

```
%% Masas
% Matriz de masas (T*seg2/m)
% Se considera W=1*D+0.25*L
D=0.700; %T/m2
L=0.250; %T/m2
m1=(D+0.25*L)*(24*45)/9.8; m2=m1;
m3=(D+0.25*L)*(24*33)/9.8;
m4=(D+0.25*L)*(24*20)/9.8; m5=m4;
M=mdiag(m1,m2,m3,m4,m5);
```

Las matrices de rigidez y masas para el análisis sísmico en sentido longitudinal tienen una dimensión de 5x5 debido a que la estructura es de 5 pisos como se muestra en la figura 8 b, para que el usuario pueda corroborar sus cálculos se presenta los valores resultantes para este ejemplo.

$$\boldsymbol{KL_x} = \begin{bmatrix} 3.44\text{E}+05 & -2.03\text{E}+05 & 3.69\text{E}+04 & -1.40\text{E}+03 & 1.77\text{E}+02 \\ -2.03\text{E}+05 & 2.68\text{E}+05 & -1.21\text{E}+05 & 8.70\text{E}+03 & -1.04\text{E}+03 \\ 3.69\text{E}+04 & -1.21\text{E}+05 & 1.14\text{E}+05 & -2.94\text{E}+04 & 5.22\text{E}+03 \\ -1.40\text{E}+03 & 8.70\text{E}+03 & -2.94\text{E}+04 & 3.92\text{E}+04 & -1.73\text{E}+04 \\ 1.77\text{E}+02 & -1.04\text{E}+03 & 5.22\text{E}+03 & -1.73\text{E}+04 & 1.30\text{E}+04 \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{M} = \begin{bmatrix} 84.03 & & & & \\ & 84.03 & & & \\ & & 61.62 & & \\ & & & 37.35 & \\ & & & & 37.35 \end{bmatrix}$$

4.4 Propiedades dinámicas

Con las matrices de rigidez y masas se puede resolver el problema de eigen valores y vectores para determinar los periodos de vibración, los modos o formas de vibración y frecuencias naturales del sistema estructural como se indica a continuación.

```
%% Propiedades dinámicas
[T,fi,OM]=orden_eig(KLX,M);
```

Los resultados de periodos de vibración son:

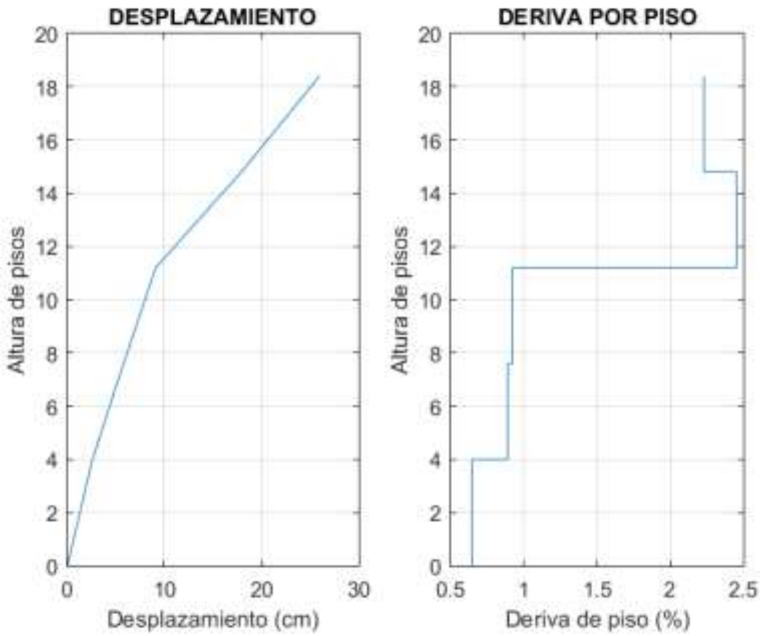
$$T = \begin{bmatrix} 0.767 \\ 0.367 \\ 0.184 \\ 0.128 \\ 0.077 \end{bmatrix}$$

4.5 Método Espectral

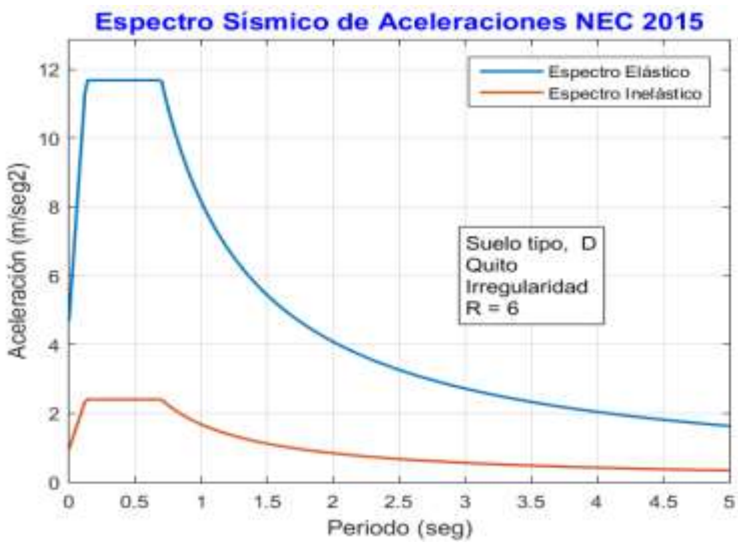
Con el programa ***espectros_nec15MOD*** se determina las aceleraciones espectrales para cada período de vibración, empleando el espectro de la NEC 2015 obtenido en la ciudad de Quito en suelo tipo D con factores de irregularidad en planta y elevación asumidos de 0.9. Con la didáctica pedagógica de que el usuario pueda saber que está haciendo en cada etapa del cálculo se puede programar la determinación de los factores de participación modal. Posteriormente ***desplazamientos_modales_CQC*** encuentra primero los desplazamientos en coordenadas de piso, en cada modo de vibración y luego utiliza el criterio de combinación modal, denominada: Combinación Cuadrática Completa, para encontrar las respuestas definitivas en el sentido de análisis.

Se tiene el cálculo de los desplazamientos laterales y derivas de piso, para el sentido longitudinal (para los 5 primeros grados de libertad que se muestran en la figura 8 a). Los resultados se indican en la figura 9 a, para la componente el espectro de la NEC 2015, que se muestra en la figura 9 b.

```
%% Análisis modal espectral
b=[1;1;1;1;1];
R=6;
fip=0.9;fie=0.9;
is=4; % Suelo D
iz=5; % Zona sísmica 5 = 0.4g
ip=2; % Region Sierra
zeda=0.05;
[Ad]=espectro_nec15MOD(R,fip,fie,T,is,iz,ip);
% Ad   Aceleraciones Espectrales para cada período de
vibración en m/seg2
% Factores de participacion modal
na=np;
for i=1:na
   FP(:,i)=abs(((fi(:,i))'*M*b)/((fi(:,i))'*M*(fi(:,i))));
end
[qte]=desplazamientos_modales_CQC(T,fi,Ad,FP,na,OM,zeda)
for i=1:np
    qti(i)=R*fip*fie*qte(i);
end
YY=unique(Y);
[DervX]=deriva(YY,qti)
```



(a)



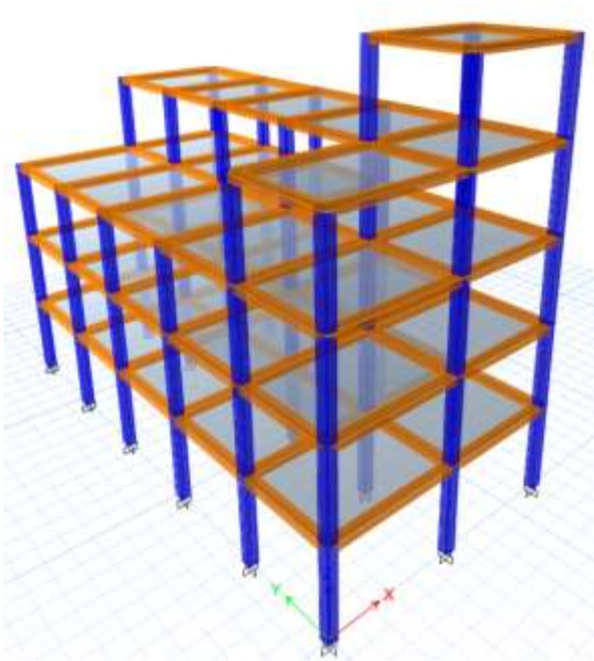
(b)

Figura 9 a) Desplazamientos laterales y derivas de piso máximas probables encontradas, en sentido longitudinal (sentido X); b) Espectro NEC 2015.

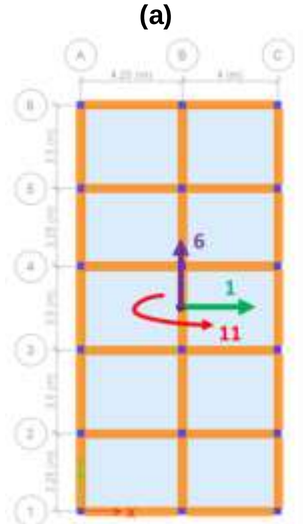
Como se puede observar en la figura 9a las derivas son superiores al 2% que se establece como límite máximo permitido en Ecuador por la NEC 2015, además debido al cambio brusco de rigidez del nivel 3 al 4 se puede visualizar un cambio en las derivas de piso aumentando radicalmente estas (más de 2 veces en las derivas del piso 4 respecto al 3).

5. ANÁLISIS SÍSMICO DE ESTRUCTURA EN 3 D

En este apartado se presenta el análisis sísmico, en sentido longitudinal de una estructura irregular de 5 pisos de hormigón armado, la vista en 3D se presenta en la figura 10 a y la vista en planta en la figura 10 b, tiene 6 pórticos en sentido X y 3 pórticos en sentido transversal. Se indican los grados de libertad de la primera planta, en el centro de masas.



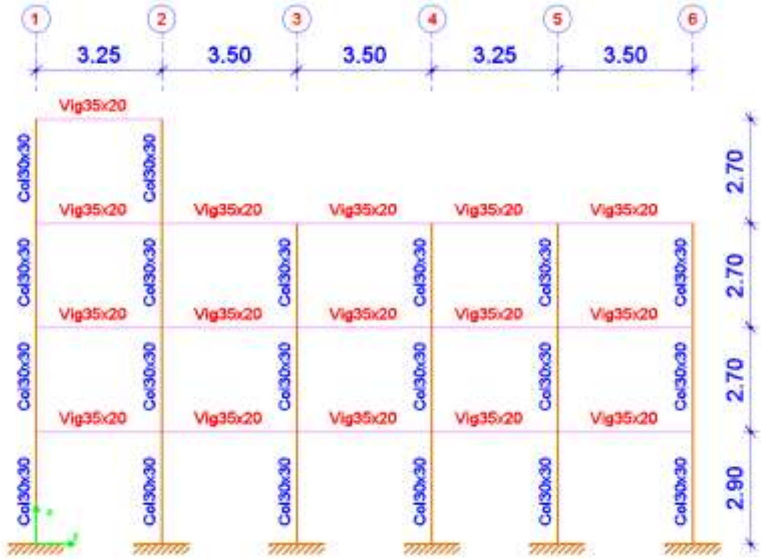
(a)



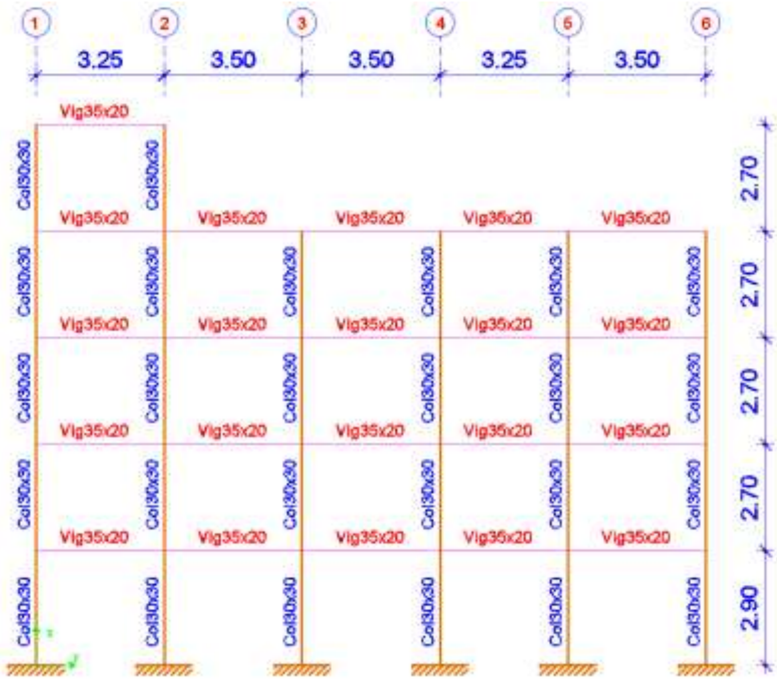
(b)

Figura 10 a) Vista tridimensional de la edificación; b) Vista en planta de la estructura, considerando los grados de libertad en el nivel 1.

Para entender la geometría de la estructura se presenta la geometría del Pórtico A en la figura 11 a, mientras que en la figura 11 b se muestra la geometría del Pórtico B que es igual al C.



(a)



(b)

Figura 11 a) Pórtico A del Bloque Estructural; b) Pórtico B y C; las columnas son de 30x30 y las vigas son de 35x20.

En el programa se presenta el valor de la resistencia del hormigón que es de $f_c' = 210\ {kg}/{cm^2}$ y la ecuación utilizada para calcular el módulo de elasticidad en T/m². Nótese que las dimensiones de las columnas se mantienen como 30/30 cm y de igual manera las dimensiones de las vigas que son de 35/20 cm, todas, en los dos sentidos. Las dimensiones de los elementos para el análisis sísmico en sentido X se almacenan en la matriz ELEMX y para el sentido Y se cambian las dimensiones de base y altura de columnas, registrando estas nuevas secciones en la matriz ELEMY.

```
%% Propiedades del material
fc =210; % La resistencia a la compresión del hormigón f´c (kg/cm2)
E=150000*sqrt(fc); % Calcula el modulo de elasticidad del hotmigón (T/m2)
%% Secciones % Col(30/30); Vigas(35/20) (cm)
ELEMX=[ 0.3 0.3;
        0.35 0.2]; % Matriz de 2x2, En la fila 1 va base altura de columnas
                   % en la fila 2 se escribe base y altura de vigas
ELEMY=[ELEMX(1,2) ELEMX(1,1);ELEMX(2,1) ELEMX(2,2)]; % Cambia en sentido Y
```

5.1 Ingreso de datos de geometría de estructura

Para generar la estructura tridimensional con las irregularidades indicadas en la figura 10 a, se tiene varias posibilidades y dependerá de cada usuario la forma de proceder. En la figura 12 se indica las partes que componen al bloque estructural en análisis.

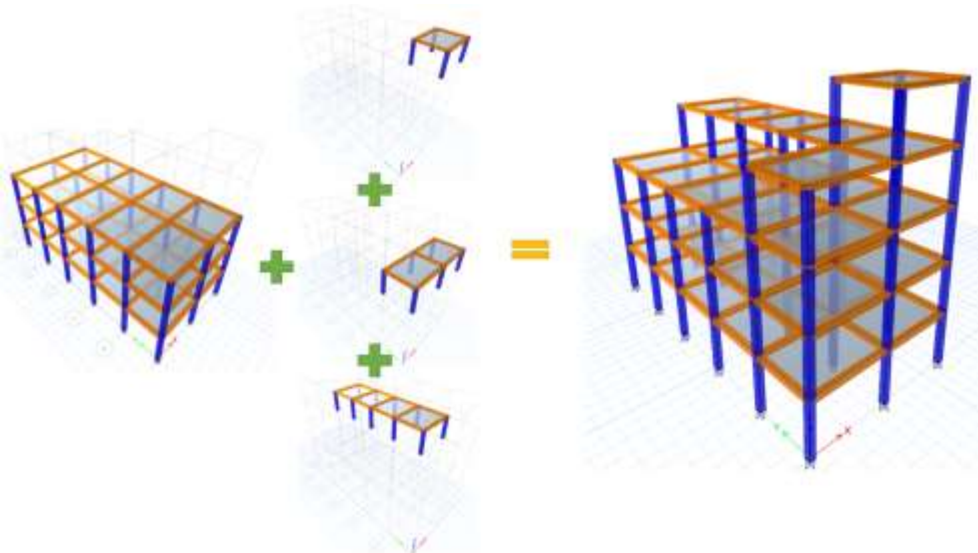
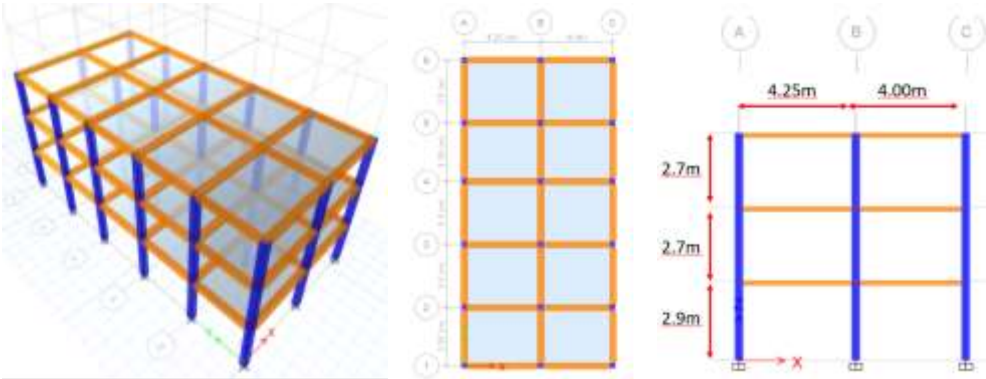


Figura 12 Composición del Bloque estructural para el análisis sísmico.

A continuación, se indica la primera parte del programa que realiza el análisis sísmico e inmediatamente se van comentando la entrada de datos.

```
%% Geometria del pórtico PARTE 1
avi =[4.25;4]; %Ingresar un vector con la logitud de vanos en (metros)
api =[2.9;2.7;2.7]; %Ingresar un vector con la altura de pisos en (metros)
CoordY1 =[0;3.25;6.75;10.25;13.5;17]; %Ingresar un vector con las coordenadas de los pórticos en dirección Y (metros)
Xo1 =0; Zo1 =0; % Coordenadas para desfase del  sistema de coordenadas 0,0,0 en (metros).
```



(a) **(b)** **(c)**

Figura 13 Parte 1 del Bloque Estructural; a) Vista tridimensional; b) Vista en planta; c) Pórtico tipo en sentido X.

Los pórticos de la parte 1 del Bloque Estructural en sentido longitudinal tienen 2 vanos de 4.25 m y 4.00 m (figura 13 c); esa información se da en la variable “sv1”; la altura de cada piso es de 2.9 m para el primer piso y 2.7 para el nivel 2 y 3, esto se da en la variable “sp1” para la estructura de 3 pisos.

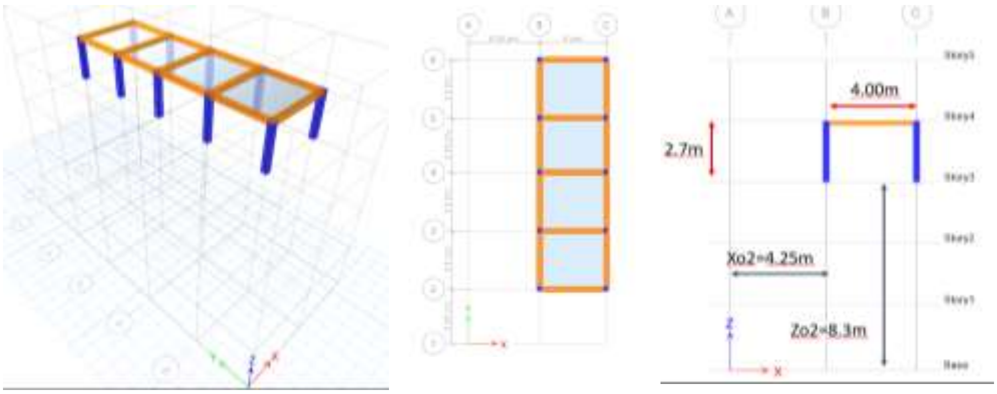
El primer dato de la variable CoordY1 es 0, que corresponde al Pórtico 1; el segundo dato es 3.25 m que es la distancia al Pórtico 2; el tercero es 6.75 m que es la distancia acumulada al Pórtico 3, para el Pórtico 4 el dato es 10.25 m, luego se tiene 13.5 m y finalmente se tiene 17.00, distancia al Pórtico 6 como se muestra en la figura 13 b.

Con los datos indicados se puede generar la estructura regular espacial que se muestra en la figura 13 a, tal y como se indica en el artículo de Aguiar et al. (2019), este bloque estructural puede ser desfasado del sistema de referencia con las coordenadas X=0, Y=0, Z=0 ubicado en la esquina inferior izquierda, las distancias para el desfase de este bloque son Xo1 =0; Zo1 =0.

Continuando la programación se indica un fragmento para la parte 2 del bloque estructural.

```
%% Planta alta con irregularidad PARTE 2
sv2 =[4]; %Ingresar un vector con la logitud de vanos en (metros)
sp2 =[2.7]; %Ingresar un vector con la altura de pisos en (metros)
CoordY2 =[3.25;6.75;10.25;13.5;17]; %Ingresar un vector con las coordenadas de los pórticos en dirección Y (metros)
Xo2 =4.25; Zo2 =8.3; % Coordenadas para desfase del  sistema de coordenadas 0,0,0 en (metros).
```

Para la segunda parte del bloque estructural se realiza un bloque regular, como se indica en la figura 14 a. En este caso el bloque estructural tiene 1 vano de 4.00 m como se visualiza en la figura 14 b, esa información se da en la variable “sv2”; posteriormente se da la altura de piso de 2.70 m que se registra en la variable “sp2” y los pórticos en sentido X que componen a esta parte de la estructura se indican en el vector CoordY2; se debe indicar el desfase del bloque estructural respecto al sistema de referencia con coordenadas X=0, Y=0, Z=0. Las distancias de desfase en sentido X se registra como Xo2 y para la altura en la cual se debe ubicar a dicho bloque estructural se registra la variable Zo2.



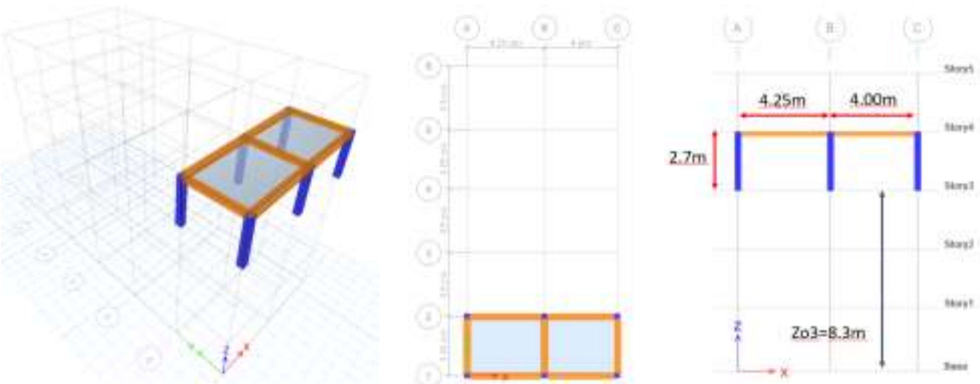
(a) **(b)** **(c)**

Figura 14 Parte 2 del Bloque Estructural; a) Vista tridimensional; b) Vista en planta; c) Pórtico tipo en sentido X.

De manera similar a los casos anteriores se debe generar la información de la parte 3 y 4 del bloque estructural como se puede apreciar en las figuras 15 y 16, se debe registrar los desfases correspondientes para generar la estructura irregular deseada como se indica en la figura 10 a.

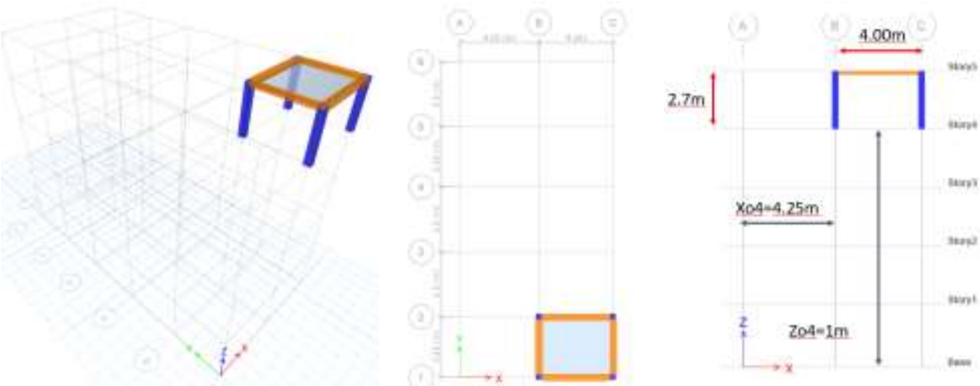
El código que ejemplifica a estos bloques estructurales se muestra a continuación.

```
%% Planta alta con irregularidad PARTE 3
sv3 =[4.25;4]; %Ingresar un vector con la logitud de vanos en (metros)
sp3 =[2.7]; %Ingresar un vector con la altura de pisos en (metros)
CoordY3 =[0;3.25]; %Ingresar un vector con las coordenadas de los pórticos en direccion Y (metros)
Xo3 =0; Zo3 =8.3;% Coordenadas para desfase del  sistema de coordenadas 0,0,0 en (metros).
%% Planta alta con irregularidad PARTE 4
sv4 =[4]; %Ingresar un vector con la logitud de vanos en (metros)
sp4 =[2.7]; %Ingresar un vector con la altura de pisos en (metros)
CoordY4 =[0;3.25]; %Ingresar un vector con las coordenadas de los pórticos en direccion Y (metros)
Xo4 =4.25;  Zo4 =11; % Coordenadas para desfase del  sistema de coordanadas 0,0,0 en (metros).
```



(a) **(b)** **(c)**

Figura 15 Parte 3 del Bloque Estructural; a) Vista tridimensional; b) Vista en planta; c) Pórtico tipo en sentido X.



(a) (b) (c)

Figura 16 Parte 4 del Bloque Estructural; a) Vista tridimensional; b) Vista en planta; c) Pórtico tipo en sentido X.

Con la información necesaria de cada parte que compone al bloque estructural se procede a almacenar en matrices los datos referentes a separación de vanos “svF”, alturas de pisos “spF”, coordenadas de los pórticos en sentido X “CoordYF” y las distancias de desface para X y Z en matrices denominadas “XoF” y “ZoF” de cada bloque estructural. Los vectores para combinar pueden ser de diferentes dimensiones, pero al ingresar en la función de ***Combinar_Vectores*** descrita anteriormente es posible generar matrices a partir de estos vectores.

```
%% Combinar las vectores de cada bloque que forman la estructura 3D
Num_Comb=4; % Hace referencia a la cantidad de bloques que forman la estructura
[svF]=Combinar_Vectores(Num_Comb,sv1,sv2,sv3,sv4,0,0,0,0,0,0);
[spF]=Combinar_Vectores(Num_Comb,sp1,sp2,sp3,sp4,0,0,0,0,0,0);
[CoordYF]=Combinar_Vectores(Num_Comb,CoordY1,CoordY2,CoordY3,CoordY4,0,0,0,0,0,0);
[XoF]=Combinar_Vectores(Num_Comb,Xo1,Xo2,Xo3,Xo4,0,0,0,0,0,0);
[ZoF]=Combinar_Vectores(Num_Comb,Zo1,Zo2,Zo3,Zo4,0,0,0,0,0,0);
%% Geometria de la estructura en 3D
[nPortX,nPortY,X,Y,Z,NI,NJ]=geom_3D_Irreg(Num_Comb,svF,spF,CoordYF,XoF,ZoF);
```

Luego de tener la información referente a toda la estructura almacenada en matrices se puede generar la geometría de esta de forma espacial, recordando que una estructura compuesta por columnas y vigas es descrita por las coordenadas de los nudos X, Y, Z, y los elementos que se generan a partir de los nudos identificando a cada elemento por el nudo inicial y final de este NI, NJ. Además, es recomendable conocer la cantidad de pórticos en cada sentido para posteriormente realizar el análisis tridimensional en base a marcos planos. Para ejecutar los cálculos de las variables mencionadas anteriormente se emplea la función ***geom_3D_Irreg***.

5.2 Dibujo de la estructura en 3D, de pórticos planos y vista en planta

Para graficar la estructura en tres dimensiones se utiliza el programa ***dibujo3D*** el mismo que se muestra en la figura 17.

```
%% Dibujo de la Estructura 3D
dibujo3D(X,Y,Z,NI,NJ);
```

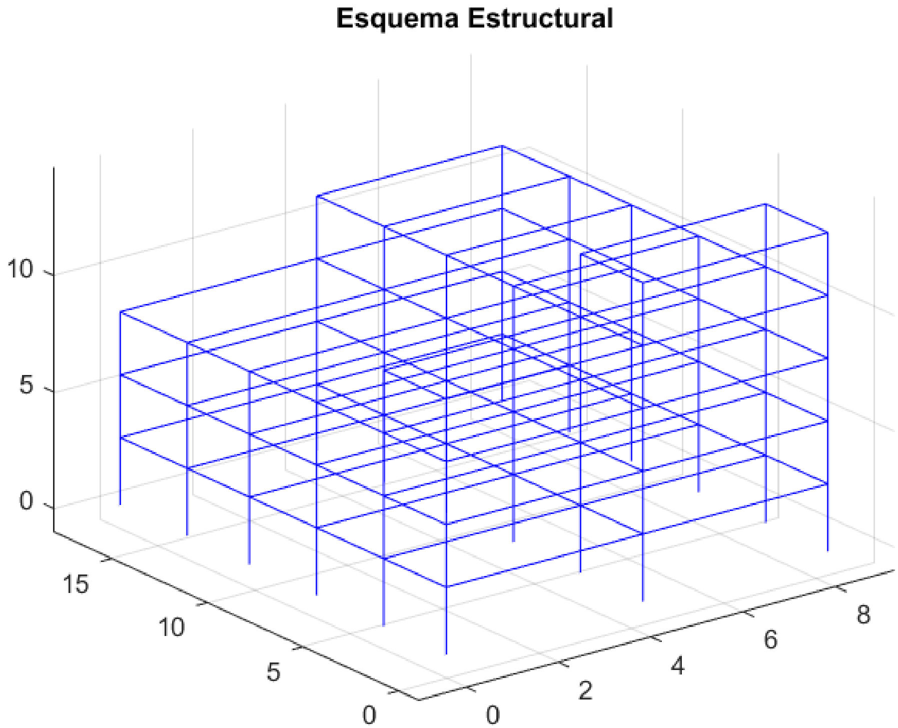


Figura 17 Dibujo en 3D, de estructura de 5 pisos que se está analizando sísmicamente con 3 grados de libertad por planta.

En algunos casos la visualización de estructuras tridimensionales es complicada y es por ello por lo que se desarrolló la función ***dibujo_2Di*** con la cual se puede graficar pórticos en sentido XZ o YZ dependiendo de la necesidad del usuario, además reporta una vista en planta de la estructura.

Los datos necesarios para la función ***dibujo_2Di*** son las coordenadas de los nudos X, Y, Z, los elementos descritos por nudo inicial y final son NI, NJ y el número de elementos nelem. La nueva información se refiere a una matriz denominada dibuj_plan en la primera fila se debe escribir 0 para pórticos en sentido X y a continuación de ello la identificación del pórtico que se desea representar, para este caso pórtico 1, 4 y 6; en la segunda fila el primer valor correspondiente a 1 es para el sentido Y, seguido del número 1 y 3 referentes a los pórticos A y C, luego para completar la dimensión de la matriz se escribe el valor de 0.

```
%% Dibujo de pórticos en 2D y vista en planta de la Estructura
dibuj_plan= [0 1 4 6;
             1 1 3 0];
% dibuj_plan=[sentido(0 es x, 1 es y)/ identificar el pórtico a dibujar]
nelem=length(NI); % Elementos de HA.
dibujo_2Di(X,Y,Z,NI,NJ,nelem,dibuj_plan);
```

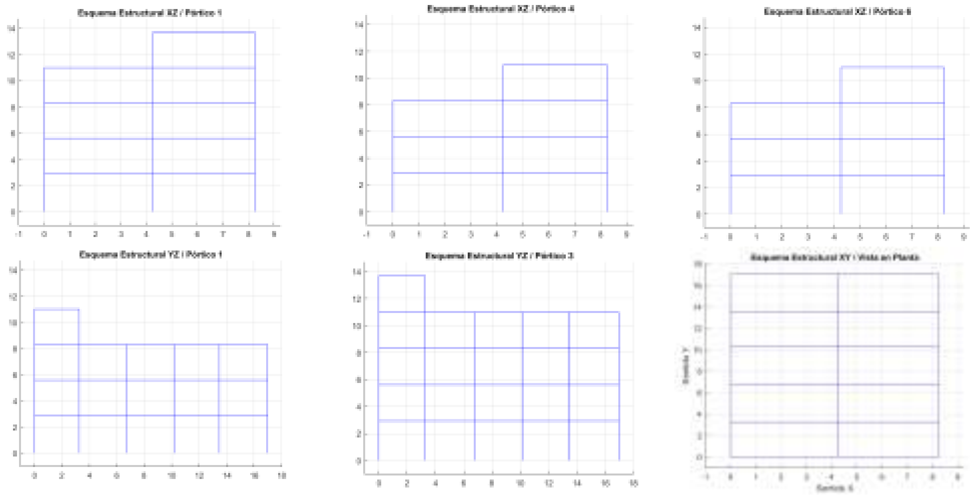
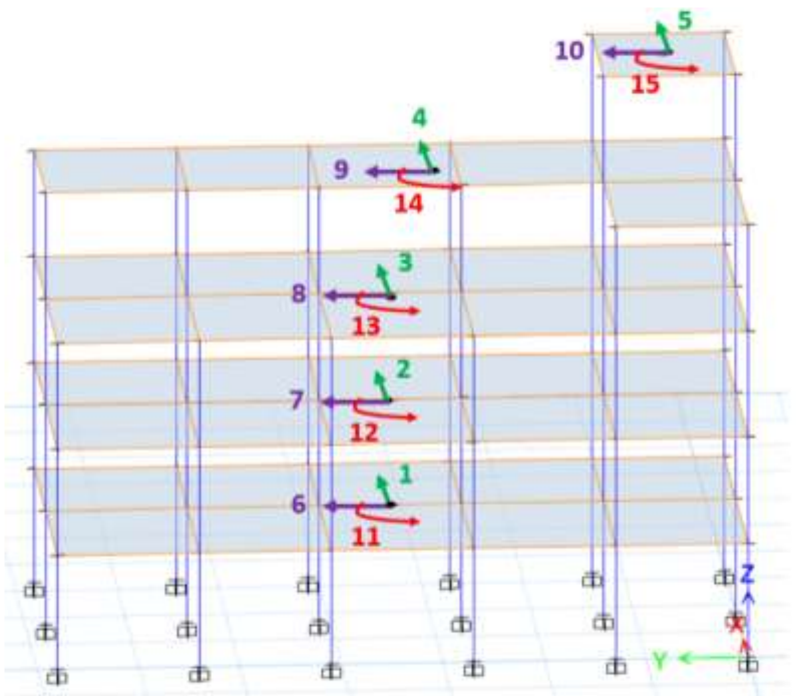


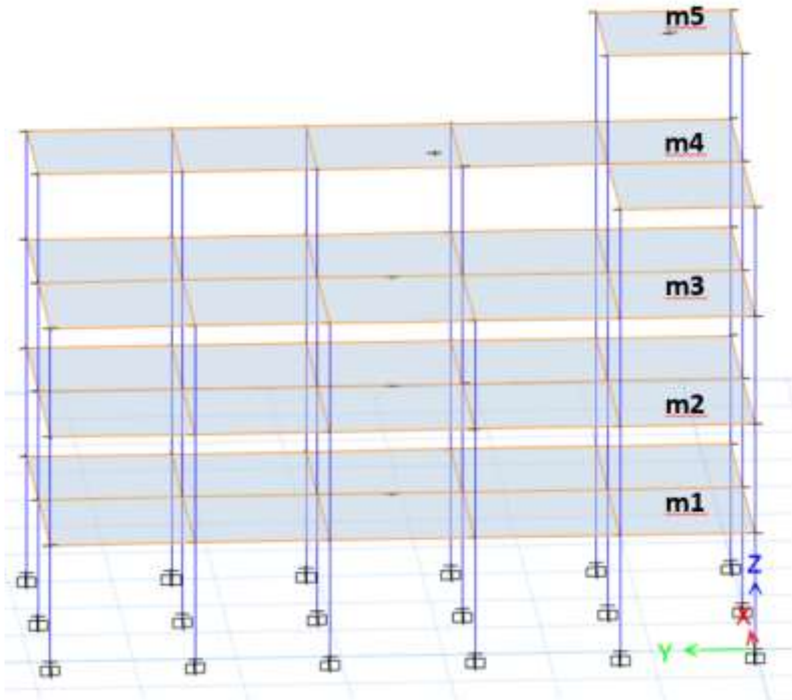
Figura 18 Pórticos en 2D, estructura de 5 pisos que se está analizando sísmicamente con 3 grados de libertad por planta y Vista en Planta.

5.3 Análisis con modelo de tres grados de libertad por planta

En la figura 19 a, se presenta el modelo de tres grados de libertad por planta. Nótese que primero se han numerado todos los grados de libertad en sentido X, desde el primer piso hacia arriba; luego desplazamientos en sentido Y, finalmente las rotaciones de piso.



(a)

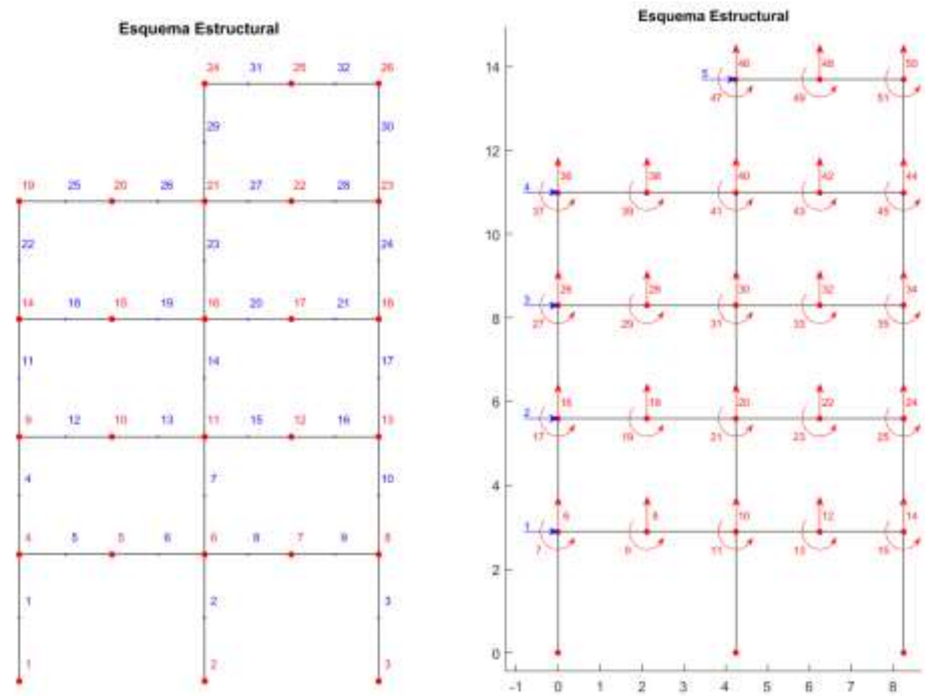


(b)

Figura 19 a) Modelo de análisis sísmico considerando tres grados de libertad por planta; b) Modelación de las masas en piso rígido.

Se tiene un lazo para el número total de pórticos en sentido X, y lo primero que se hace es de la base de datos que se tienen para todos los pórticos, se determinan los datos que permiten evaluar la matriz de rigidez lateral de un solo pórtico, esto se lo hace con: ***Datos_KLx_3D_Irreg,*** con esta función se determina, el número de grados de libertad del pórtico; la base y la altura se halla en el archivo *ELEMXi,* la longitud de cada uno de los elementos del pórtico se encuentra en *Lxi*; el seno y coseno que permiten encontrar la matriz de rotación de coordenadas locales a globales se hallan en: *senoxi; cosenoxi;* el vector de colocación (grados de libertad del nudo inicial y final) se hallan en *VCXi*; y el módulo de elasticidad del material *E*.

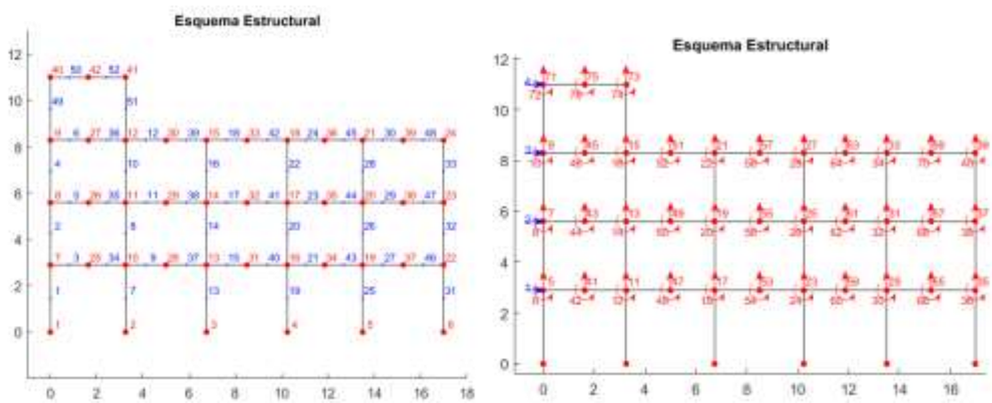
Para cada pórtico en análisis se reordenan los elementos, las coordenadas de los nudos y las propiedades de cada elemento de la estructura que se involucra en el análisis. En la figura 20 a se indica la numeración de nudos y elementos, con azul los elementos y de rojo los nudos. En estos pórticos la numeración de los elementos no necesariamente es primero columnas y posteriormente vigas como se acostumbraba a hacer en ejemplos expuesto anteriormente. La numeración de nudos y grados de libertad también podría ser en un orden diferente al conocido, pero se mantiene que en cada nivel el grado de libertad en sentido horizontal de los nudos del nivel son correspondientes a las coordenadas principales (figura 20 b).



(a) **(b)**

Figura 20 Pórtico en sentido X; a) Numeración de Nudos y Elementos; b) Numeración de los grados de libertad, con azul se indican las coordenadas principales.

A continuación, en la figura 21 a, se presenta la numeración de nudos y elementos, en la figura 21 b se tiene los grados de libertad para un pórtico en sentido Y.



(a) **(b)**

Figura 21 Pórtico en sentido Y; a) Numeración de Nudos y Elementos; b) Numeración de los grados de libertad, con azul se indican las coordenadas principales.

Con esta información se determina la matriz de rigidez del pórtico para los grados de libertad indicados en la figura 20 b; luego se realiza la condensación estática de la matriz de rigidez mediante la solución de ecuaciones lineales. *KL.* Esta matriz se la almacena en una matriz *KLXi.*

```
%% Análisis en 2D de cada pórtico en sentido "XZ"
AltuPort=unique(Z); % Niveles de la estructura
npT=length(AltuPort)-1; % Número maximo de pisos de estructura
KLX=zeros(npT,npT);
for i=1:nPortX
[nglXi,ELEMXi,Lxi,senoxi,cosenoxi,VCXi,Xxi,Zxi,NIXi,NJXi,CGXi]=Datos_KLx_3D_Irreg(i,nPortY,ELEMX,X,Y,Z,NI,NJ);
%................................DIBUJO 2D del pórtico en sentido "XZ"
%  dibujo(Xxi,Zxi,NIXi,NJXi)
%  dibujogdl(Xxi,Zxi,NIXi,NJXi,CGXi)
%  dibujoNodElem(Xxi,Zxi,NIXi,NJXi,CGXi)
%.......................................................................
AltuPort=unique(Zxi); % Nivel de cada piso en XZ
np=length(AltuPort)-1; % Número de pisos en este pórtico
%  Contribucion de elementos de hormigon
[K]=krigidez(nglXi,ELEMXi,Lxi,senoxi,cosenoxi,VCXi,E);
% Condensacion de K
na=np;%#gdl por planta, considerar na=np
kaa=K(1:na,1:na);
kab=K(1:na,na+1:nglXi);
kba=kab';
kbb=K(na+1:nglXi,na+1:nglXi);
% Segunda forma de calculo con un sistema de ecuaciones
T=-kbb\kba;
KL=kaa+kab*T;
%Primera forma de calculo con inversa de la matriz
%KL=kaa-kab*inv(kbb)*kba
KLi=zeros(npT,npT); KLi(1:np,1:np)=KL;
KLXi((i-1)*npT+1:i*npT,:)=KLi; %Almacena las matrices de rigidez de los pórticos en X
KLX=KLX+KLi; %Sumar la matriz de rigidez de pórticos en X
end
```

$$\boldsymbol{KLXi} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{KL}^{(1)} \\ \boldsymbol{KL}^{(2)} \\ \boldsymbol{KL}^{(3)} \\ \boldsymbol{KL}^{(4)} \\ \boldsymbol{KL}^{(5)} \\ \boldsymbol{KL}^{(6)} \end{bmatrix}$$

Finalmente, en la variable *KLX* se van sumando las matrices de rigidez lateral de los pórticos en sentido X, de tal manera que:

$$\boldsymbol{KLX} = \sum_{i=1}^{npx} \boldsymbol{KL}^{(i)}$$

Donde la sumatoria se extiende al número de pórticos en sentido X, denominada *npx* en la fórmula o nPortX, en el programa.

Para que se comprueben los resultados, a continuación, se presenta la submatriz de la matriz de rigidez en coordenadas de piso, denominada $\boldsymbol{K}_{xx}$

$$\boldsymbol{K}_{xx} = \begin{bmatrix} 23119.34 & -14675.1 & 4320.528 & -562.179 & 28.89 \\ -14675.1 & 20359.09 & -12446.2 & 2728.48 & -137.139 \\ 4320.528 & -12446.2 & 15365.83 & -7138.64 & 687.09 \\ -562.179 & 2728.48 & -7138.64 & 6513.562 & -1643.57 \\ 28.89 & -137.139 & 687.09 & -1643.57 & 1069.385 \end{bmatrix}$$

En el sentido Y, se realiza lo propio, por lo que solo se presenta el listado del programa sin explicación. Solo se indica que se halla

$$KLYi = \begin{bmatrix} KL^{(A)} \\ KL^{(B)} \\ KL^{(C)} \end{bmatrix}$$

$$KLY = \sum_{i=1}^{npy} KL^{(i)}$$

```
%% Análisis en 2D de cada pórtico en sentido "YZ"
AltuPort=unique(Z); % Niveles de la eestructura
npT=length(AltuPort)-1; % Número máximo de pisos de estructura
KLY=zeros(npT,npT);
for i=1:nPortY
[nglYi,ELEMYi,Lyi,senoyi,cosenoyi,VCYi,Yyi,Zyi,NIYi,NJYi,CGYi]=Datos_KLy_3D_Irreg(i,nPortX,ELEMY,X,Y,Z,NI,NJ);
%.................................DIBUJO 2D del pórtico en sentido "YZ"
%     dibujo(Yyi,Zyi,NIYi,NJYi)
%     dibujogdl(Yyi,Zyi,NIYi,NJYi,CGYi)
%     dibujoNudElem(Yyi,Zyi,NIYi,NJYi,CGYi)
%.....................................................................

AltuPort=unique(Zyi); % Nivel de cada piso en XZ
np=length(AltuPort)-1; % Número de pisos en este pórtico
%  Contribucion de elementos de hormigon
[K]=krigidez(nglYi,ELEMYi,Lyi,senoyi,cosenoyi,VCYi,E);
% Condensacion de K
na=np;%#gdl por planta, considerar na=np
kaa=K(1:na,1:na);
kab=K(1:na,na+1:nglYi);
kba=kab';
kbb=K(na+1:nglYi,na+1:nglYi);
% Segunda forma de calculo con un sistema de ecuaciones
T=-kbb\kba;
KL=kaa+kab*T;
%Primera forma de calculo con inversa de la matriz
%KL=kaa-kab*inv(kbb)*kba
KLi=zeros(npT,npT); KLi(1:np,1:np)=KL;
KLYi((i-1)*npT+1:i*npT,:)=KLi; %Almacena las matrices de rigidez de los pórticos en X
KLY=KLY+KLi; %Sumar la matriz de rigidez de pórticos en X
end
```

Para encontrar la matriz de rigidez en coordenadas de piso se utiliza el programa: ***matriz_es***, también se puede utilizar el programa ***matriz_es1.*** Los datos de entrada para el primero de los programas son los siguientes:

- ***[KE,rtet,A]=matriz_es(ntot,iejes,np,r,KLT,RT);***

Este programa se explica en algunos artículos escritos por el primer autor del artículo, se realiza un resumen para que el lector recuerde los datos y resultados de este programa. ***notot*** es el número total de pórticos de la estructura; ***iejes*** es el número de pórticos en el sentido de análisis; ***np*** es el número de pisos; ***r*** es la distancia del centro de masas al pórtico, se da un solo valor por pórtico y sirve solo para estructuras regulares en planta y elevación; ***KLT*** matriz que contiene todas las matrices de rigidez lateral de los pórticos, primero en sentido del análisis símico que para este caso es X, luego en sentido transversal que para el ejemplo será Y; ***RT*** es una matriz con las distancias del centro de masas al pórtico en cada uno de los pisos, esta variable se utiliza en estructuras irregulares.

A diferencia del artículo "Nuevas Funciones del Sistema CEINCI-LAB para Análisis Sísmico Espacial" en el cual la estructura espacial era regular, en esta ocasión los programas presentados son para estructuras irregulares en planta y elevación por lo que se debe indicar al programa *r=0*. Cuando se ejecuta este programa pregunta si la estructura es regular o irregular; en el caso de irregulares va a trabajar solo con la variable RT.

El programa reporta: ***KE*** que es la matriz de rigidez en coordenadas de piso; ***rtet*** es una matriz que contiene, las matrices con las distancias del centro de masas a cada uno de los pórticos y en cada piso. Finalmente encuentra la matriz de compatibilidad ***A***, entre las coordenadas de piso y las coordenadas laterales de los pórticos. Aguiar (2012, 2014).

```
%% Datos para obtener la matriz de rigidez de la estructura 3D con 3gdl por piso
Xcm1=8.25/2; Ycm1=17/2; Xcm2=Xcm1; Ycm2=Ycm1;Xcm3=Xcm1; Ycm3=Ycm1;
Xcm4=5.55; Ycm4=7.34; Xcm5=4.25+4.0/2; Ycm5=3.25/2;
CoordY1 =[0;3.25;6.75;10.25;13.5;17]
% Ri es una matriz con las distancias desde el CM
% hacia el pórtico i en cada piso
% SENTIDO X
R1=[Ycm1 Ycm2 Ycm3 Ycm4 Ycm5]; % Pórtico 1
R2=[Ycm1-3.25 Ycm2-3.25 Ycm3-3.25 Ycm4-3.25 Ycm5-3.25]; % Pórtico 2
R3=[Ycm1-6.75 Ycm2-6.75 Ycm3-6.75 Ycm4-6.75 Ycm5-6.75]; % Pórtico 3
R4=[Ycm1-10.25 Ycm2-10.25 Ycm3-10.25 Ycm4-10.25 Ycm5-10.25]; % Pórtico 4
R5=[Ycm1-13.5 Ycm2-13.5 Ycm3-13.5 Ycm4-13.5 Ycm5-13.5]; % Pórtico 5
R6=[Ycm1-17 Ycm2-17 Ycm3-17 Ycm4-17 Ycm5-17]; % Pórtico 6
% SENTIDO Y
RA=[Xcm1 Xcm2 Xcm3 Xcm4 Xcm5]; % Pórtico A
RB=[Xcm1-4.25 Xcm2-4.25 Xcm3-4.25 Xcm4-4.25 Xcm5-4.25]; % Pórtico B
RC=[Xcm1-8.25 Xcm2-8.25 Xcm3-8.25 Xcm4-8.25 Xcm5-8.25]; % Pórtico C
% Colocando Ri como diagonal
R1=diag(R1); % Pórtico 1
R2=diag(R2); % Pórtico 2
R3=diag(R3); % Pórtico 3
R4=diag(R4); % Pórtico 4
R5=diag(R5); % Pórtico 5
R6=diag(R6); % Pórtico 5
RA=diag(RA); % Pórtico A
RB=diag(RB); % Pórtico B
RC=diag(RC); % Pórtico C
% Vector para estructura irregular
RX=[R1;R2;R3;R4;R5;R6]; RY=[RA;RB;RC];
RTX=[RX;RY]; % Colocar primero las matrices en X y luego Y
ntot=nPortX+nPortY;
iejes=nPortX;
r=0;
%% Análisis sismico en sentido X
KL=[KLXi;KLYi];
[KEX,rtet,A]=matriz_es(ntot,iejes,npT,r,KL,RTX);
```

En el sentido Y, el análisis es muy similar, por lo que no se detalla una explicación y se presenta el listado del programa como sigue:

```
%% Datos para obtener la matriz de rigidez de la estructura 3D con 3gdl por piso
iejes=nPortY;
rY=0;
RTY=[RY;RX]; % Colocar primero las matrices en Y y luego X
te=2;  % te es 1 para estructuras regulares y 2 para irregulares
%% Análisis sismico en sentido Y
KL=[KLYi;KLXi];
[KEY,rtet,A]=matriz_es(ntot,iejes,npT,rY,KL,RTY);
```

5.4 Propiedades dinámicas

Como se manifiesta en otros artículos la filosofía de ***CEINCI-LAB*** es que el usuario también programe algo, para que de esta manera entienda más lo que

está haciendo, por esta razón no se utilizó ningún programa para el cálculo de la matriz de masas en coordenadas de piso.

En este apartado, se indica la carga permanente D considerada en T/m^2, en cada uno de los pisos; para este análisis no se considera la carga transitoria L, y el cálculo de la matriz de masas se detalla en el siguiente fragmento del programa.

```
%% Masas
% Matriz de masas (T*seg2/m)
% Se considera W=1*D+0*L
D=0.700; %T/m2
D2=0.500; %T/m2
m1=D*(8.25*17)/9.8; m2=m1;m3=m1;
m4=D2*(8.25*17-4.25*(17-3.25))/9.8;
m5=D2*(4*3.25)/9.8;
a=8.25;b=17;
J1=m1/12*(a^2+b^2);J2=J1;J3=J1;
a=4;b=17;
J4=m4/12*(a^2+b^2);
a=4;b=3.25;
J5=m5/12*(a^2+b^2);

m=mdiag (m1,m2,m3,m4,m5); J=mdiag(J1,J2,J3,J4,J5);
M=mdiag(m, m, J);
```

El cálculo de los periodos de vibración de la estructura, los modos de vibración y las frecuencias naturales del sistema con análisis en sentido X se lo realiza con el programa ***orden_eig.***

```
[TX,fiX,OMX]=orden_eig(KEX,M);
disp('Matriz de Rigidez Espacial de la estructura sentido X con 3gdl por piso')
KEX % Matriz de rigidez de la estructura en 3D con 3gdl por piso
disp(' ')
disp('Los periodos de vibración en sentido X son:')
TX % seg
```

En la tabla 1 se detalla los resultados de los periodos y modos de vibración de la estructura cuando se realiza el análisis símico en sentido X.

Tabla 1 Propiedades dinámicas para análisis sísmico en sentido X

	Modo 1	Modo 2	Modo 3	Modo 4	Modo 5	Modo 6	Modo 7	Modo 8	Modo 9	Modo 10	Modo 11	Modo 12	Modo 13	Modo 14	Modo 15
Período (seg)	0,92	0,81	0,71	0,29	0,26	0,23	0,17	0,16	0,14	0,12	0,10	0,09	0,09	0,09	0,07
MODOS DE VIBRACIÓN	-0,05	0,01	0,02	-0,12	0,00	-0,09	-0,09	-0,12	0,12	0,03	-0,14	0,13	-0,01	0,00	0,01
	-0,14	0,02	0,04	-0,17	0,00	-0,08	-0,03	-0,02	-0,02	-0,02	0,12	-0,16	0,02	0,01	-0,02
	-0,20	0,02	0,06	-0,02	0,00	0,05	0,09	0,12	-0,10	-0,01	-0,04	0,13	-0,02	-0,01	0,03
	-0,26	0,01	0,01	0,23	0,00	0,13	-0,02	-0,07	0,23	0,06	-0,08	-0,17	0,02	0,03	-0,08
	-0,33	-0,05	-0,28	0,58	-0,02	-0,45	-0,40	-0,40	-0,40	-0,16	0,38	0,28	-0,03	-0,10	0,18
	0,00	0,06	-0,02	-0,01	-0,14	0,02	-0,14	0,09	-0,02	0,16	0,03	-0,01	-0,15	-0,01	-0,01
	0,00	0,14	-0,05	-0,01	-0,18	0,02	-0,05	0,02	0,00	-0,09	-0,03	0,01	0,19	0,01	0,02
	0,01	0,20	-0,07	0,00	-0,01	-0,01	0,14	-0,09	0,01	-0,06	0,01	-0,01	-0,15	-0,01	-0,02
	0,02	0,25	-0,01	0,02	0,25	-0,03	-0,02	0,01	-0,05	0,27	0,02	0,01	0,18	0,02	0,04
	0,03	0,28	0,02	0,03	0,55	0,03	-0,61	0,51	0,17	-0,63	-0,08	-0,03	-0,23	-0,01	-0,05
	0,00	0,00	-0,01	-0,01	0,00	0,02	-0,01	-0,02	-0,02	0,00	-0,02	-0,02	-0,01	0,02	0,03
	0,00	-0,01	-0,02	-0,01	0,01	0,03	-0,01	-0,01	-0,01	0,00	0,01	0,01	0,00	-0,02	-0,03
	-0,01	-0,01	-0,04	-0,01	0,00	0,00	0,01	0,01	0,02	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,03
	-0,01	-0,01	-0,04	0,00	0,00	-0,05	0,01	0,03	-0,02	0,01	-0,04	-0,02	0,00	0,02	-0,04
	-0,01	-0,01	-0,05	0,01	0,00	-0,08	0,02	0,05	-0,07	0,02	-0,26	-0,24	0,03	-0,71	0,19

Para el sentido Y se realiza las siguientes operaciones:

```
[TY,fiY,OMY]=orden_eig(KEY,M);
disp('Matriz de Rigidez Espacial de la estructura sentido Y con 3gdl por piso')
KEY % Matriz de rigidez de la estructura en 3D con 3gdl por piso
disp(' ')
disp('Los periodos de vibración en sentido Y son:')
TY % seg
```

5.5 Método Espectral

El usuario debe programar el cálculo de los factores de participación modal. Luego de ello llama a dos programas el uno denominado ***espectros_nec15MOD*** que determina las aceleraciones espectrales para cada período de vibración, empleando el espectro de la NEC 2015 obtenido en la ciudad de Quito en suelo tipo D con factores de irregularidad en planta y elevación asumidos de 0.9. El otro programa que se emplea es el denominado ***desplazamientos_modales_CQC*** que encuentra primero los desplazamientos en coordenadas de piso, en cada modo de vibración y luego utiliza el criterio de combinación modal, denominada: Combinación Cuadrática Completa, para encontrar las respuestas definitivas en el sentido de análisis.

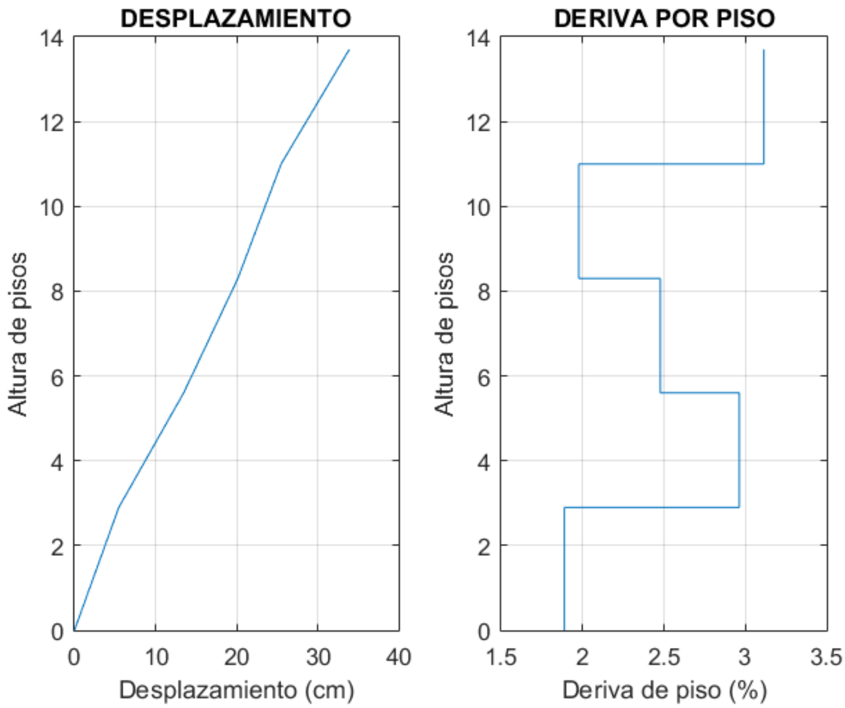
```
%% Análisis Modal, espectro de la NEC 2015
R=4;
fip=0.9;fie=0.9;
is=4; % Suelo D
iz=5; % Zona sismica 5 = 0.4g
ip=2; % Region Sierra
[Ad]=espectro_nec15MOD(R,fip,fie,TX,is,iz,ip);
% Ad   Aceleraciones Espectrales para cada periodo de vibración en m/seg2
% Factores de participacion modal
bx=[1;1;1;1;1];by=[0;0;0;0;0];bz=[0;0;0;0;0];
b=[bx;by;bz];
na=npT*3;
for i=1:na
    gamaX(:,i)=abs(((fiX(:,i))'*M*b)/((fiX(:,i))'*M*(fiX(:,i))));
end
zeda=0.05;
[qteX]=desplazamientos_modales_CQC(TX,fiX,Ad,gamaX,na,OMX,zeda);
for i=1:npT
    qtiX(i)=R*fip*fie*qteX(i);
end
YY=AltuPort;
[DervX]=deriva(YY,qtiX)
```

En la tabla 2 se presenta el factor de participación modal Γ en los modos de vibración y las respectivas aceleraciones espectrales Ad para el sismo **con el espectro de la NEC15.** Se puede observar que el modo 1 es el que tiene 40% de participación en el análisis sísmico dejando un 5% para el modo rotacional.

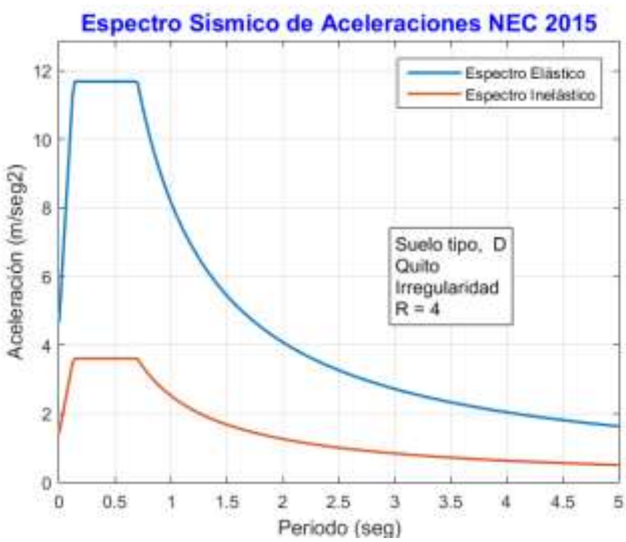
Tabla 2 Factores de participación modal y aceleraciones espectrales para sismo en sentido X

	Modo 1	Modo 2	Modo 3	Modo 4	Modo 5	Modo 6	Modo 7	Modo 8	Modo 9	Modo 10	Modo 11	Modo 12	Modo 13	Modo 14	Modo 15
Γ	5,24	0,47	0,99	1,82	0,02	0,89	0,64	0,82	0,66	0,16	0,60	0,52	0,06	0,02	0,05
Γ (%)	**40%**	4%	8%	14%	0%	**7%**	5%	6%	5%	1%	**5%**	4%	0%	0%	0%
Ad (m/s2)	2,72	3,10	3,54	3,60	3,60	3,60	3,60	3,60	3,60	3,42	3,20	3,02	3,00	2,91	2,70

Al final se tiene el cálculo de los desplazamientos laterales y derivas de piso, para el sentido longitudinal (para los 5 primeros grados de libertad que se muestran en la figura 19 a). Los resultados se indican en la figura 22 a, para la componente el espectro de la NEC 2015, que se muestra en la figura 22 b.



(a)



(b)

Figura 22 a) Desplazamientos laterales y derivas de piso máximas probables encontradas, en sentido longitudinal (sentido X); b) Espectro NEC 2015.

Se realiza el análisis modal espectral en sentido transversal, el procedimiento es muy similar al realizado en sentido X y por ello solo se mostrará únicamente la secuencia de programación sin mayor explicación.

```
%% Análisis Modal, espectro de la NEC 2015
R=4;
fip=0.9;fie=0.9;
is=4; % Suelo D
iz=5; % Zona sismica 5 - 0.4g
ip=2; % Region Sierra
[Ad]=espectro_nec15MOD(R,fip,fie,TY,is,iz,ip);
% Ad   Aceleraciones Espectrales para cada periodo de vibración en m/seg2
% Factores de participacion modal
by=[1;1;1;1;1];bx=[0;0;0;0;0];bz=[0;0;0;0;0];
b=[by;bx;bz];
na=npT*3;
for i=1:na
    gama(:,i)=abs(((fiY(:,i))'*M*b)/((fiY(:,i))'*M*(fiY(:,i))));
end
zeda=0.05;
[qteY]=desplazamientos_modales_CQC(TY,fiY,Ad,gama,na,OMY,zeda);
for i=1:npT
     qtiY(i)=R*fip*fie*qteY(i);
end
YY=AltuPort;
[DervY]=deriva(YY,qtiY)
```

El resultado más relevante tiene que ver con los desplazamientos y derivas por esa razón se mostrara en la figura 23 estos resultados del análisis en sentido Y.

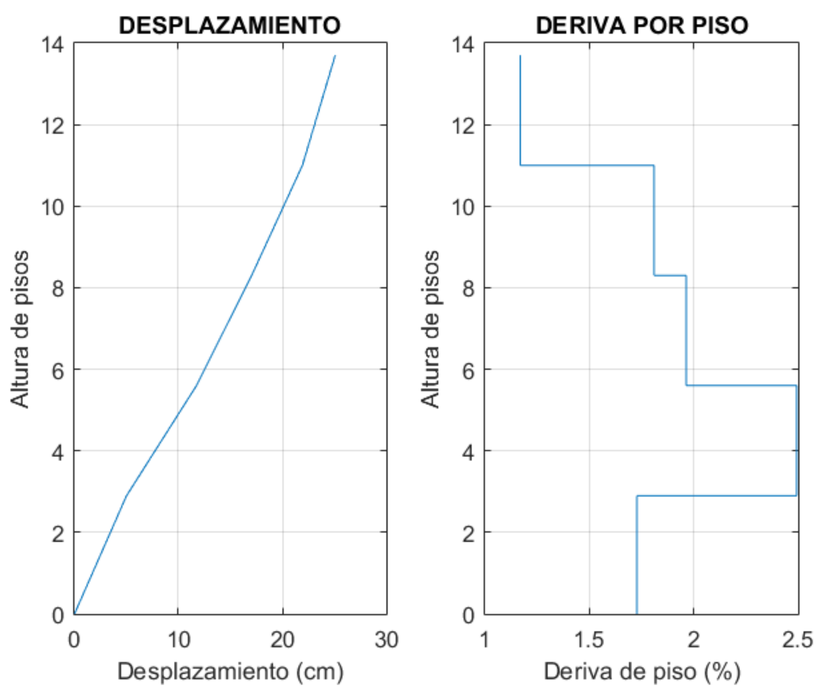


Figura 23 Desplazamientos laterales y derivas de piso máximas probables.

En la presentación de informes puede ser conveniente realizar una sola grafica que contenga los desplazamientos y derivas máximas de piso encontradas en el análisis sísmico en sentido X y Y por ello se presenta la función ***deriva2*** cuyo resultado es la figura 24.

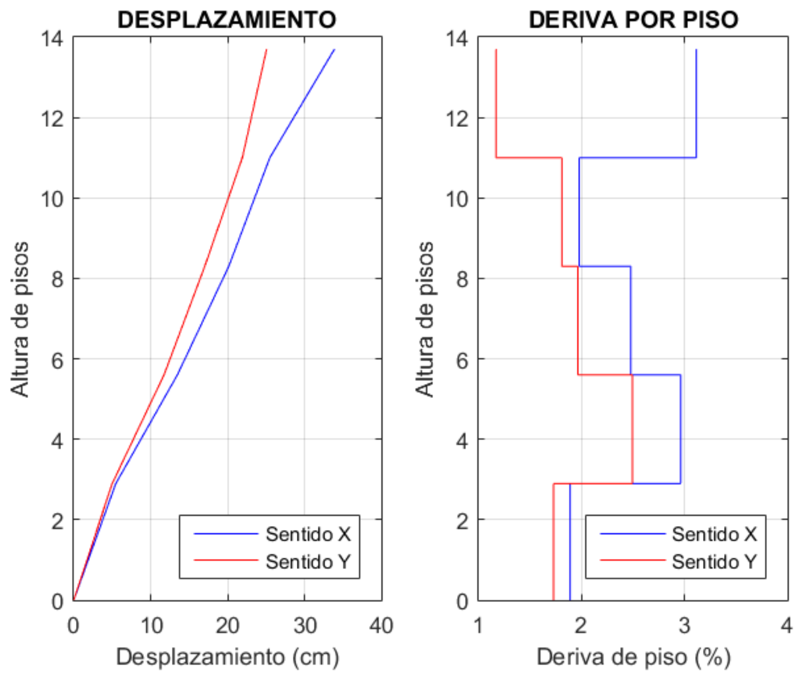


Figura 24 Desplazamientos laterales y derivas de piso máximas probables.

6. COMENTARIOS Y CONCLUSIONES

Los programas de ***CEINCI-LAB*** tienen una capacidad de análisis muy poderosa que debe ser aprovechada, en especial porque el profesional realiza conscientemente los cálculos.

Las estructuras en análisis son muy flexibles, las derivas de piso son superiores al límite máximo de la Norma (2%) y ante un evento sísmico estas estructuras son vulnerables estructuralmente y llegarán a sufrir mucho daño.

La estructura espacial presenta deficiencias en el comportamiento estructural que no han sido presentadas pero que evidencian la necesidad de realizar un reforzamiento para cumplir como mínimo la normativa y aumentar la seguridad de los ocupantes.

La filosofía del sistema de computación ***CEINCI-LAB*** de ser un programa académico se mantiene y con estas nuevas funciones se intenta motivar al usuario para que aprenda a realizar el análisis sísmico espacial de estructuras irregulares paso a paso, se han presentado nuevas funciones con las cuales se

dibuja muy fácilmente en 2 D y 3 D, la estructura y la entrada de datos de las secciones de sus elementos lo realiza en una forma muy fácil.

Los programas del sistema de computación ***CEINCI-LAB*** que aquí se han presentado se encuentran en Aguiar (2020, 1, 2) y en el siguiente link:

http://departamentos.uleam.edu.ec/ingenieria-sismica/interfase-en-matlab-basica/

REFERENCIAS

1. Aguiar R., (2020, 1), *Método Espectral Básico,* Proyecto: Sistema de Computación ***CEINCI-LAB.*** DOI 10.13140/R.G.2.2.25590.55366 Research Gate.

2. Aguiar R., (2020, 2), *Pórticos Planos Básico,* Proyecto: Sistema de Computación ***CEINCI-LAB.*** DOI 10.13140/R.G.2.2.36202.47048 Research Gate.

3. Aguiar, R., Cagua, B., & Pilatasig, J. (2019). Nuevas Funciones del Sistema ***CEINCI-LAB*** para Análisis Sísmico Espacial. Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras, 24(3), 259-276.

4. Aguiar R., Cagua B., Pilatasig J., Zambrano E., (2019), "Interface for ***ICEINCI-LAB*** and new functions", *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras,* **24, (2),** 167-199

5. Aguiar R., (2014), *Análisis Matricial de Estructuras,* Instituto Panamericano de Geografía e Historia IPGH, cuarta edición, 676 p., Quito.

6. Aguiar R., (2012), *Dinámica de Estructuras con CEINCI-LAB,* Centro de Investigaciones Científicas. Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, segunda edición, 416 p.

7. García, Ó. R., García, L. M. J., Castelló, L. P., Aparicio, A. G., & Vidal, A. P. (2018). *MATLAB: conceptos básicos y descripción gráfica*. Universidad Miguel Hernández.

8. Mañas, J. F., & Pinta, M. A. (2018). Métodos Numéricos para el Análisis Matemático con Matlab.